



Université de Sidi Belabes Djilali Liabes
Faculté de Génie électrique
Département d'Electrotechnique



Thèse de Doctorat

En Electrotechnique

Spécialité : Réseau Electrique

Intitulé :

Contrôle intelligent des puissances dans un réseau électrique constitué de sources d'énergies renouvelables

Présenté par :

MEKKAOUI Ali

Devant le jury composé de :

Président	NACERI Abdellatif	Professeur	UDL-SBA
Rapporteur	LAOUER Mohammed	professeur	CU Naama
Co-Rapporteur	YOUNES Mimoun	Professeur	UDL SBA
Examineur	BENTAALLAH Abdelrahim	Professeur	UDL-SBA
Examineur	ALLALI Ahmed	Professeur	USTO-MB
Examineur	BOUZEBODJA Abdelhamid	Professeur	USTO-MB

Soutenu le 01/07/2021

Dédicace

À ma défunte mère, celle qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté fait toujours les grands hommes. Chère mère que la terre te soit légère et qu'Allah t'accueille dans ses paradis célestes,

À mon défunt père, celui qui attendait avec patience les fruits de sa bonne éducation, pour tous les sacrifices qu'il a consentis pour mon bien être et les conseils qu'il m'a prodigué tout au long de mon éducation, chère père que la terre te soit légère et qu'Allah t'accueille dans ses paradis célestes ainsi que mes défunts frère, sœur et ma femme Abdelkrim, Nawal et Karima.

À ma deuxième femme, l'amour vieillit mais ne meurt jamais. À mes fils Zakaria, Rafik, Abdeladdim et Hanine, À toute la famille Mekkaoui, Qui m'ont soutenu par leur amour et leurs efforts, et qui m'ont toujours encouragé. Qu'ils trouvent ici l'hommage de ma gratitude qui, si grande qu'elle puisse être, ne sera à la hauteur de leurs sacrifices et leurs prières pour moi.

À tous mes amis, je leur dédie ce travail, expression de mon grand amour avec tous mes vœux de bonheur et de prospérité. À tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin, À toutes les personnes qui méritent d'être citées dans cette Thèse, Je leur dédie ce travail, expression de ma reconnaissance.

À tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.

Ali MEKKAOUI

Remerciements

Qu'il me soit d'abord permis de remercier et d'exprimer ma gratitude envers le bon Dieu, qui m'a donné la patience et le courage pour que je puisse continuer ce travail.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance, mes vifs remerciements pour mon encadreur Pr Laouer Mohamed, qui a consacré à l'encadrement de mon travail un temps et une disponibilité d'esprit considérables, auxquels j'ai été d'autant plus sensible que son emploi du temps est très chargé. Son rôle, ses critiques constructives, ses précieux conseils et ses propositions m'ont permis de mener à bien ce travail et toujours d'aller de l'avant. J'ai ainsi largement pu profiter de sa grande acuité scientifique. Je lui suis donc redevable d'avoir pu faire un travail dans des conditions exceptionnelles.

Je tiens aussi à remercier Pr Mimoun Younes, professeur à l'Université de Sidi Belabes, qui a co-dirigé et animé l'élaboration de ce travail. Il a été toujours disponible pour répondre à mes questions, à m'encourager et à m'aider à résoudre les problèmes rencontrés. Qu'il trouve ici, tout mon respect et ma profonde reconnaissance, pour sa rigueur scientifique et les conseils judicieux et éclairés qu'il m'a prodigués pour l'élaboration de ce travail. Je le remercie également pour ses qualités humaines et de m'avoir supportée (dans tous les sens du terme) pendant la durée des travaux.

Mes sincères remerciements aux membres de jury qui ont bien voulu honorer de leur présence ma soutenance.

En fin, je remercie vivement tous ceux qui de près ou de loin, ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de cette Thèse.

Ali MEKKAoui

Publication

Journaux

- [1] MEKKAOUI Ali, LAOUER Mohammed, YOUNES Mimoun, « Power exchange in smart grids integrating renewable energy », PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 96 NR 12/2020, p-p 91,94,
- [2] Ali MEKKAOUI, Mohammed LAOUER, Younes MIMOUN, « Modeling and simulation for smart grid integration of solar/wind energy » Leonardo Journal of Sciences ISSN 1583-0233, Issue 30, January-June 2017, p. 31-46
- [3] Ali MEKKAOUI, Mohammed LAOUER, Mimoun YOUNES, «The role of smart grids in integrating renewable energy », Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, ISSN 1583-1078, Issue 30, January-June 2017, p. 119-126,
- [4] Mekkaoui A. Laouer M. Younes M. «Etude comparative des performances d'un Statcom et d'un SVC sur la stabilité d'un parc éolien connecté au réseau électrique », Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°1 (2014) 149–157

Conférences internationales

- [1] Mekkaoui Ali, Laouer Mohamed, « Etude de l'effet compensatoire d'un parc éolienne à vitesse fixe » The INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS& OIL: FROM THEORY TO APPLICATIONS March 05-06, 2013, Ouargla, Algeria
- [2] Mekkaoui Ali, Laouer Mohamed and MimounYounes « STATCOM and capacite bank in a fixed wind farm », The international conference on technologie and materiels for renewable energy environnement and sustainability, ICTMREES 2014, Beirut April 10-13- 2014,
- [3] Mekkaoui Ali, Laouer Mohamed, Mimoun Younes, « Etude comparative de deux dispositifs FACTS sur la stabilité de la tension d'un parc éolien connecté au réseau électrique », 3 international conference on power electronics and electrical drives, ICPEED'14- December 10-11, 2014, USTO, Oran, Algeria
- [4] Mekkaoui Ali, Laouer Mohamed, Mimoun Younes, « Power exchange in smart grids inegrating renewable energy », Première conférence internationale sur les réseaux intelligent CIREI'2019, 28-29 Avril 2019, ENP Oran- MA- Algerie
- [5] Mekkaoui Ali, Laouer Mohamed, Mimoun Younes, « Etude de la stabilité de l'integration d'un parc éolien à vitesse fixe dans un réseau électrique », International conference on electrical engineering, November 17- 19, 2013, Bechar Algeria
- [6] Mekkaoui Ali, Laouer Mohamed, Mimoun Younes, « Etude comparative des performances d'un STATCOM et d'un SVC sur la stabilité d'un parc éolien connecté au

réseau électrique », Troisième séminaire international sur les énergies nouvelles et renouvelables SIENR 2014, Ghardaïa, les 13- 14 Octobre 2014

[7] Mekkaoui Ali, Laouer Mohamed, Mimoun Younes, « The role of smart grids in integrating renewable energy », 1 Conférence nationale sur l'électrotechnique et les énergies renouvelables CNEER'18, Saida, Novembre 13-14, 2018

Titre

Contrôle intelligent des puissances dans un réseau électrique constitué de sources d'énergies renouvelables

Résumé

Les consommateurs de l'énergie électrique sont en évolution éminemment variable d'une année à une autre. En Algérie, il faut envisager dans les dix années à venir qu'il y aura une demande importante d'énergie électrique et éventuellement des abonnés qui pourront eux-mêmes contribuer au renforcement du réseau global. Le vecteur de l'énergie électrique doit avoir toutes les caractéristiques nécessaires pour être véhiculer dans les deux sens ou autrement dit, produit ou consommé. L'équation d'équilibre entre la production et la consommation doit être obligatoirement vérifiée à tout moment et en tout lieu. Sauf que pour se faire, nous serons dans l'obligation de contrôler le transit de puissances en tout point du réseau. L'appel en puissances et l'extension inopinée du réseau perturbent le transit de puissances en temps réel. Y-a-t-il un moyen de contrôler vérifier puis enfin prendre la décision qui assure la meilleure gestion électrique sans une défaillance importante qui mettra le système en situation critique voire catastrophique. Les smart grids ou réseaux électriques intelligents apportent la solution idéale à notre problématique bien qu'ils constituent une variante bien intéressante quant à l'économie de l'énergie. Le système classique doit impérativement être modifié car d'autres composantes vont s'ajouter pour le rendre plus complexe et difficilement gérable. L'écosystème des réseaux électriques intelligents va ainsi s'articuler autour de trois différents systèmes qui assurent une gestion unidirectionnelle de l'amont vers l'aval par une gestion systématique intégrée à plusieurs niveaux et bidirectionnelle : de la production centralisée aux productions décentralisées

Mots clés

Smart grid- Smart meter- Puissance active- Optimisation- Contrôle

Titre

Intelligent power control in an electricity grid made up of renewable energy sources

Abstract

Consumers of electrical energy are highly variable from year to year. In Algeria, it is necessary to envisage in the next ten years that there will be a significant demand for electrical energy and possibly subscribers who will themselves be able to contribute to strengthening the global network. The vector of electrical energy must have all the characteristics necessary to be conveyed in both directions or in other words, produced or consumed. The equilibrium equation between production and consumption must be verified at all times and in all places. Except that to do so, we will be obliged to control the transit of power at any point of the network. The demand for power and the unexpected extension of the network disrupt the transit of power in real time. Is there a way to check, verify and finally make the decision that ensures the best electrical management without a major failure that will put the system in a critical or even catastrophic situation. smart grids or intelligent electricity grids provide the ideal solution to our problem, although they constitute a very interesting variant when it comes to saving energy. The classic system must imperatively be modified because other components will be added to make it more complex and difficult to manage. The smart electricity grid ecosystem will thus be structured around three different systems that provide unidirectional management from upstream to downstream through systematic integrated management at several levels and bidirectional: from centralized production to decentralized production

Keywords

Smart grid- Smart metter- Active power- Optimization- Control

العنوان

تحكم ذكي في الطاقة في شبكة كهرباء مكونة من مصادر طاقة متجددة

المخلص

يتباين مستهلكو الطاقة الكهربائية بدرجة كبيرة من سنة إلى أخرى. في الجزائر ، من الضروري أن نتصور في السنوات العشر القادمة أنه سيكون هناك طلب كبير على الطاقة الكهربائية وربما المشتركين الذين سيكونون قادرين على المساهمة في تعزيز الشبكة العالمية. يجب أن يتمتع ناقل الطاقة الكهربائية بجميع الخصائص اللازمة لنقله في كلا الاتجاهين أو بمعنى آخر ، إنتاجه أو استهلاكه. يجب التحقق من معادلة التوازن بين الإنتاج

والاستهلاك في جميع الأوقات وفي جميع الأماكن. وباستثناء القيام بذلك ، سنكون ملزمين بالتحكم في نقل الطاقة في أي نقطة من الشبكة. يؤدي الطلب على الطاقة والتوسع غير المتوقع للشبكة إلى تعطيل نقل الطاقة في الوقت الفعلي. هل هناك طريقة للتحكم والتحقق ثم اتخاذ القرار النهائي الذي يضمن أفضل إدارة كهربائية دون عطل كبير من شأنه أن يضع النظام في موقف حرج أو حتى كارثي. توفر الشبكات الذكية أو شبكات الكهرباء الذكية الحل الأمثل لمشكلتنا ، على الرغم من أنها تشكل متغيرًا مثيرًا للاهتمام عندما يتعلق الأمر بتوفير الطاقة. يجب تعديل النظام الكلاسيكي بشكل حتمي لأنه ستنم إضافة مكونات أخرى لجعله أكثر تعقيدًا ويصعب إدارته. وبالتالي ، سيتم تنظيم النظام البيئي لشبكة الكهرباء الذكية حول ثلاثة أنظمة مختلفة توفر إدارة أحادية الاتجاه من المنبع إلى المصب من خلال الإدارة المتكاملة المنهجية على عدة مستويات وثنائية الاتجاه: من الإنتاج المركزي إلى الإنتاج اللامركزي

الكلمات الرئيسية

الشبكة الذكية - المقياس الذكي - الاستطاعة الفعالة- التحسين - التحكم

Liste des matières

Liste des symboles_____	i
Liste des figures_____	ii
Liste destableaux_____	iii
Introduction Générale_____	01

Chapitre 1 *Etat de l'art sur les énergies renouvelables*

1.1 Introduction_____	04
1.2 Notion générale _____	04
1.2.1 Réchauffement climatique_____	04
1.2.2 Augmentation des températures _____	04
1.2.3 Causes d'augmentation de la température _____	06
1.2.4 La limite des réserves mondiales d'énergies _____	07
1.2.5 Début de la fin des ressources énergétique fossile _____	07
1.3 L'énergie électrique non renouvelable _____	07
1.3.1 Energie thermique _____	08
1.3.2 Energie par piles à combustible_____	08
1.4 L'énergie électrique renouvelable_____	10
1.4.1 L'énergie hydraulique_____	10
1.4.2 L'énergie de la biomasse_____	10
1.4.3 L'énergie de la géothermie_____	10
1.4.4 L'énergie solaire_____	11
1.4.5 Energie de la mer_____	11
1.4.6 L'énergie éolienne_____	12
1.5 Aperçu historique et consommation des énergies renouvelables_____	12
1.5.1 Aperçu historique de l'éolien_____	12
1.5.2 Aperçu historique de l'énergie solaire_____	13
1.5.3 Consommation des énergies renouvelables dans le monde_____	14
1.6 Architecture des systèmes électriques_____	14
1.6.1 Fonctionnement_____	14

1.6.2 Les réseaux de transport	14
1.6.3 Les réseaux de distribution	14
1.6.4 Contrôle et suivi des réseaux électriques	15
1.7 Nécessité des réseaux électriques intelligents	15
1.8 Les micro-réseaux	16
1.9 Conclusion	16

Chapitre 2 *Modélisation de l'ensemble des éléments des énergies renouvelables*

2.1 Introduction	18
2.2 Modélisation de la chaîne de production éolienne	18
2.2.1 Caractéristiques du vent : aspects aérodynamiques	18
2.2.1.1 Loi de Betz.	18
2.2.1.2 Modèle du vent	20
2.2.2 Partie Mécanique	21
2.2.2.1 Modèle de la turbine	21
2.2.2.1.1 Hypothèses simplificatrices.	22
2.2.2.2 Modèle des pâles	23
2.2.2.3 Modèle du multiplicateur	25
2.2.2.4 Modélisation de l'arbre de la machine	25
2.2.2.5 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	27
2.2.2.6 Technique d'extraction du maximum de la puissance	28
2.3 Partie électrique	30
2.3.1 Présentation de la machine.	30
2.3.2 Hypothèse de travail	31
2.3.3 Représentation de la machine dans le Repère (ABC)	31
2.3.4 Equations électriques réelles de la machine	32
2.3.5 Équations magnétiques	33
2.3.6 Le couple électromagnétique	34
2.3.7 Modèle de la génératrice asynchrone dans le plan	35
2.3.7.1 Transformation de Park.	35
2.3.7.2 Transformation inverse de Park	36
2.3.7.3 Modèle de base de Park	36

2.3.8 Modèle d'état de la génératrice asynchrone _____	39
2.4 Simulation de la chaîne éolienne basée sur une génératrice asynchrone_	40
2.4.1 Évolution de la vitesse de rotation et du couple électromagnétique	41
2.4.2 Évolution des courants et flux statoriques_____	42
2.4.3 Évolution des courants et flux rotoriques_____	42
2.4.5 Évolution des Puissances statoriques_____	43
2.5 Modélisation d'un générateur photovoltaïque_____	43
2.5.1 Modèle mathématique d'une cellule solaire_____	43
2.5.2 Modèle mathématique d'un panneau solaire de Ns cellules en série	45
2.5.3 Modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque_____	46
2.5.4 Association des panneaux photovoltaïques_____	47
2.5.4.1 Association en série _____	47
2.5.4.2 Association en parallèle _____	48
2.5.4.3 Association mixte des panneaux solaires photovoltaïques_____	49
2.6 Influence de l'éclairement et de la température sur le comportement d'un générateur PV_____	50
2.6.1 Influence de la température_____	50
2.6.2 Influence de l'éclairement_____	51
27 Conclusion_____	52

Chapitre 3. *Etude du réseau électrique intelligent*

3.1 Introduction _____	54
3.2 Contrainte d'intégration des énergies renouvelables _____	54
3.3 Les raisons de recours au réseau électrique intelligent_____	54
3.4 Nécessité d'une nouvelle approche _____	54
3.5 Réseaux électriques intelligents _____	55
3.6 Caractéristiques du réseau électrique intelligent_____	56
3.6.1 Équilibrage de l'offre et la demande_____	56
3.6.2 Auto-cicatrisation_____	56
3.6.3 Réduction des pertes_____	56
3.6.4 Minimisation des sollicitations matérielles_____	57
3.6.5 Régulation de tension_____	57

3.6.6 Contrôle du réseau électrique _____	57
3.6.7 Sécurité Informatique _____	57
3.7 Enjeux du réseau électrique intelligent _____	57
3.7.1 Un Enjeux Industriel _____	57
3.7.2 Un Enjeu social _____	58
3.7.3 Un Enjeu économique _____	58
3.7.4 Un Enjeu environnementale _____	58
3.8 Utilité du réseau intelligent _____	58
3.9 Objectif du réseau électrique intelligent _____	58
3.9.1 Mise à niveau de l'heure de la tarification _____	59
3.10 Types de réseaux intelligents _____	59
3.10.1 Au niveau des gestionnaires de réseaux de transport _____	59
3.10.2 Au niveau des gestionnaires de réseaux de distribution _____	59
3.10.3 Au niveau du client _____	59
3.11 Ville intelligente _____	60
3.11.1 Maison intelligente _____	61
3.11.2 Serveur de ville _____	62
3.11.3 Serveur principale _____	62
3.12 Compteur intelligent électrique _____	62
3.12.1 Modèle de système de comptage _____	63
3.12.2 Fonctionnalités des systèmes de comptage _____	63
3.13 Technologie de communication de réseau intelligent _____	64
3.13.1 ZigBee _____	64
3.13.2 WiMax _____	64
3.13.3 Communication cellulaire _____	65
3.13.4 Communication avec fil _____	65
3.13.5 La fibre optique _____	65
3.13.6 Communication par ligne électrique _____	65
3.14 Comparaison des réseaux classiques et des réseaux électriques intelligents _____	66
3.15 Conclusion _____	67

Chapitre 4 Echange de puissance dans un réseau électrique intelligent

4.1 Introduction	68
4.2 Approvisionnement de l'énergie dans un foyer	68
4.2.1 Gestion des appareils	68
4.2.2 Évaluation de la consommation	69
4.2.2.1 Choix de la méthode	69
4.2.2.2 Méthode de calcul	69
4.2.3 Résolution par programmation dynamique	70
4.2.3.1 Méthode d'approvisionnement de l'énergie	70
4.2.3.2 Méthode de consommation de l'énergie	71
4.3 Gestion de l'offre et de la demande	72
4.4 Difficulté de la gestion de l'offre et la demande	72
4.4.1 Choix de la méthode optimale	72
4.4.2 Interaction entre consommateur et producteur	72
4.4.3 Algorithme des Enchères du micro-réseau	73
4.5 Attribution finale	74
4.6 Analyse et contrôle de la puissance active	74
4.6.1 Rôle de l'Analyse des Flux de Puissance dans le Smart Grid	75
4.6.2 Organigramme d'un système intelligent	75
4.7 Système de stockage au niveau des consommateurs	76
4.7.1 Intégration du système de stockage dans un système de production d'énergie renouvelable	77
4.8 Résultats de simulation et analyse	78
4.8.1 Premier scénario	79
4.8.2 Deuxième scénario	89
4.9 Conclusion	93
Conclusion générale	95
Annexe	98
Bibliographies	104

Liste des symboles

Symboles spécifique aux panneaux voltaïques

V_{co}	Tension d'une cellule	[V]
V_{pco}	Tension de tout l'assemblage	[V]
I_{cc}	Le courant de court-circuit	[A]
I_{pcc}	Le courant de regroupement	[A]
R_s	Résistance série	[Ω]
R_{sh}	Résistance parallèle	[Ω]
I_{ph}	Le courant produit par les cellules ;	
q	La charge électron $q=1.6*10^{19}C$;	[C]
K	Le constant Boltzmann $K=1.38*10^{23}J/K$	[J/K]
T_c	La température de travail de la cellule	[K]
A	Le facteur de qualité de la diode, compris entre 1 et 2	
G	L'éclairement;	[W/m ²]
T	Température;	[K]
I_{ph}	Le courant de court-circuit de la cellule dans les conditions standards $G_t=1000W/m^2$ $T=25^{\circ}C=298K$	[A]
I_{rs}	Le courant de saturation inverse	[A]
E	L'énergie de bang-gap	
D	Diode	

Symboles spécifiques à la turbine

V_v	Vitesse du vent.	[m/s]
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne.	

$P_{\text{éd}}$	Puissance aérodynamique extraite du vent.	[W]
C_{td}	Le couple statique fournie par l'éolienne.	[Nm]
G	Gain du multiplicateur	
R	Longueur d'une pôle	[m]
$J_{\text{pôle}}$	Moment d'inertie d'une pale	[kg·m ²]
kt	Coefficient d'élasticité	
dt	Coefficient de frottement par rapport à l'air	
$f_{\text{pôle}}$	Coefficient de frottement par rapport au support	
βb	Vitesses d'orientations d'une pôle,	[rd/s]
Ft	Force reçoit par une pôle,	[N]
ρ	Masse volumique du vent.	[Kg·m ³]
λ	Vitesse relative.	[m]
S	Surface circulaire balayée par la turbine.	[m ²]
Ω	Vitesse de rotation de la turbine	[rad/s]
H	Hauteur de l'éolienne.	[m]
f_t	Coefficient dû aux frottements visqueux de la turbine.	[Nm/rad/s]
J_t	Moment d'inertie de la turbine l'éolienne.	[Kg·m ²]
$l(r)$	Longueur de la corde à la distance de l'axe de rotation.	
m	Masse d'air.	[N]
β	Angle de calage.	[deg]
C_L	Coefficient de portance.	
C_D	Coefficient de traînée.	
C	Facteur d'échelle.	[m/s]
E_C	Energie cinétique	[J]

Symboles spécifiques à l'arbre d'entraînement des pôles

J_h	Moment d'inertie.	[kg·m ²]
k_h	Coefficient d'élasticité,	
D_h	Coefficient de frottement par rapport au multiplicateur	

Symboles spécifiques à l'arbre de la génératrice

J_g	Moment d'inertie.	$[kg \cdot m^2]$
d_g	Coefficient de frottement	
J	Inertie totale sur le rotor de la génératrice	$[kg \cdot m^2]$
C_{mec}	Couple mécanique	$[N \cdot m]$
C_{em}	Couple électromagnétique	$[N \cdot m]$
f	Coefficient de frottements visqueux	$[Nm \cdot s / rd]$
Ω_{mec}	Vitesse mécanique	$[rd / s]$

Paramètres de modélisation de la machine

R_r	Résistance rotorique par phase,	$[\Omega]$
L_s	Inductance propre statorique,	$[H]$
L_r	Inductance propre rotorique,	$[H]$
M_{sr}, M_{rs}	Inductances mutuelles entre le stator et le rotor,	$[H]$
l_s, l_r	Inductances propres d'une phase statorique et d'une phase rotorique, respectivement.	$[H]$
m_s, m_r	Coefficients inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques, respectivement.	$[H]$
σ	Facteur de dispersion : $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s}$,	
p	Nombre de paires de pôles,	
J	Moment d'inertie de la partie tournante,	$[kg \cdot m^2]$
C_{em}	Couple électromagnétique.	$[N \cdot m]$
C_r	Couple résistant	$[N \cdot m]$
P_s	Puissances active au niveau de stator.	$[W]$
Q_s	Puissances réactive au niveau de stator.	$[Var]$
Z_G	Impédance de la génératrice	$[\Omega]$

Repère

S_a, S_b, S_c Axes liés aux enroulements triphasés statoriques.

R_a, R_b, R_c Axes liés aux enroulements triphasés rotoriques.

(d, q) Axes de référentiel de Park

(α, β) Axes de référentiel de Park (fixe au stator).

θ Position angulaire du rotor par rapport au stator.

θ Position angulaire du stator par rapport à l'axe (d) .

θ Position angulaire du rotor par rapport à l'axe (d) .

Grandeurs électriques au stator

V_{as}, V_{bs}, V_{cs} Tensions de phase. [V]

V_{ds}, V_{qs} Tensions statoriques dans le repère (d, q) [V]

$V_{\alpha s}, V_{\beta s}$ Tensions statoriques diphasées dans le repère (α, β) . [V]

i_{as}, i_{bs}, i_{cs} Courants statoriques triphasés. [A]

i_{ds}, i_{qs} Courants statoriques diphasés dans le repère tournant (d, q) . [A]

$i_{\alpha s}, i_{\beta s}$ Courants statoriques diphasés dans le repère (α, β) . [A]

P_s Puissance active statorique. [W]

Q Puissance réactive statorique. [Var]

Grandeurs électriques au rotor

V_{ar}, V_{br}, V_{cr} Tensions rotoriques triphasées (tensions nulles). [V]

V_{dr}, V_{qr} Tensions rotoriques diphasées dans le repère (d, q) [V]

i_{ar}, i_{br}, i_{cr} Courants rotoriques triphasés. [A]

Grandeurs magnétiques au stator

ϕ_{ds}, ϕ_{qs} Flux statoriques diphasés dans le repère tournant (d, q) . [Wb]

$\phi_{\alpha s}, \phi_{\beta s}$ Flux statoriques diphasés dans le repère (α, β) . [Wb]

Grandeurs magnétiques au rotor

ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c	Flux magnétiques au rotor.	[Wb]
ϕ_d, ϕ_q	Flux rotoriques diphasés dans le repère tournant (d, q) .	[Wb]
ϕ_α, ϕ_β	Flux rotoriques diphasés dans le repère (α, β) .	[Wb]

Grandeurs mécaniques de la machine

ω_m	Pulsation mécanique.	[rad/s]
ω	Pulsation électrique des grandeurs statoriques.	[rad/s]
ω_r	Pulsation électrique des grandeurs rotoriques.	[rad/s]
F	Fréquence électrique des grandeurs statoriques.	[Hz]
f_m	Coefficient de frottement de la machine.	[Nm/rad/s]
Ω_m	La vitesse de rotation de la machine asynchrone.	[rad/s]
J_m	Inertie de la machine.	[Kg.m ²]

Sigles utilisés dans la thèse

EnR	Energie renouvelable.
GAS	Génératrice Asynchrone.
MPPT	Maximum power point tracking.
PV	Photovoltaïque.
WT	Wind Turbine.
TSR	Tip speed ratio (λ).
PCC	Point commun de connexion.
DC	Direct Current
BT	Base tension
MT	Moyen tension
HT	Haute tension
AIE	Agence internationale de l'énergie
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe Intergouvernemental des Experts du Climat

GWEC	Global Wind Energy Council
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
EMS	Energy Management System
TIC	Technologies de l'information et de la communication
PLC	Communication par ligne électrique
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

Liste des figures

N ° Figures	Titre des figures	Page
Chapitre 1		
Figure 1.1	Les principaux gaz à effet de serre_____	06
Figure 1.2	Production mondiale d'électricité basée sur les énergies renouvelables_____	09
Figure1.3	Evolution des dispositifs éoliens de l'Antiquité à nos jours_____	12
Figure1.4	Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions_____	13
Figure1.5	Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde_____	13
Figure1.6	Architecture traditionnelle du système électrique_____	14
Chapitre 2		
Figure2.1	Schéma macroscopique d'un aérogénérateur éolien_____	18
Figure2.2	Schéma d'une éolienne_____	19
Figure2.3	Coefficient aérodynamique de puissance_____	20
Figure2.4	Vitesse du vent en fonction du temps _____	21
Figure2.5	Système mécanique de l'éolienne _____	22
Figure2.6	Modèle mécanique de la turbine éolienne._____	23
Figure2.7	Profil aérodynamique d'une pale _____	23
Figure2.8	Coefficient aérodynamique en fonction du rapport de vitesse de la turbine	24
Figure2.9	Schéma bloc du modèle des pâles._____	24
Figure2.10	Schéma bloc du modèle du Multiplicateur de vitesse _____	25
Figure2.11	Schéma bloc du modèle de l'arbre mécanique _____	25
Figure2.12	Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne _____	26
Figure2.13	Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne _____	27
Figure2.14	Caractéristiques à différentes vitesses de vent._____	28
Figure2.15	Convergence vers le point optimal._____	30
Figure2.16	Génératrice Asynchrone dans le contexte éolien._____	31
Figure2.17	Représentation des enroulements de la génératrice dans l'espace électrique	32
Figure2.18	Repères de référence: Statorique α_s, β_s rotorique α, β et tournant d-q._	36
Figure2.19	Représentation de la machine dans le repère de Park _____	38

Figure2.20	Modèle Matlab Simulink de la chaîne éolienne basé sur une GAS.	41
Figure2.21	(a) Vitesse de rotation de la GAS	
	(b) Couple électromagnétique de la GAS	41
Figure2.22	(a) Courants statoriques	
	(b) Flux statoriques	42
Figure2.23	(a) Courants rotoriques	
	(b) Flux rotoriques	42
Figure2.24	(a) Puissances active statoriques	
	(b) Puissances réactive statoriques	43
Figure2.25	Circuit équivalent d'une cellule solaire	44
Figure2.26	Groupement de N_s cellules en série	45
Figure2.27	Matrice solaire formée de plusieurs groupes de colonne solaire formant un générateur photovoltaïque	47
Figure2.28	Simulation de six panneaux PV en série	48
Figure2.29	Simulation de six panneaux PV en parallèle	49
Figure2.30	Simulation d'un groupement mixte de panneaux PV, avec $N_{ss}=3$ et $N_{pp}=2$	50
Figure2.31	Courbes I-V et P-V pour différentes températures avec $G=1000 \text{ W/m}^2$	51
Figure2.32	Courbes I-V et P-V pour différents éclairagements avec $T=25^\circ\text{C}$	51

Chapitre 3

Figure 3.1	Exemple de réseaux électriques intelligents	60
Figure 3.2	Du "Smart Grid" au "Smart Home" en passant par le « Smart City »	61
Figure 3.3	Un modèle de maison intelligente	61
Figure 3.4	Un système de compteurs communicant	63

Chapitre 4

Figure 4.1	Algorithme de résolution par la méthode de sac à dos	70
Figure 4.2	Développement de la méthode du niveau micro-réseau	73
Figure 4.3	Echange de puissance et d'information dans un réseau électrique intelligent	75
Figure 4.4	Organigramme du système intelligent	76
Figure 4.5	Système de production d'énergie Solaire avec stockage	78
Figure 4.6	Système de production d'énergie éolien avec stockage	78
Figure 4.6	Résultats de simulation de première maison pendant la période d'automne	80

Figure 4.7	Résultats de simulation de la deuxième maison pendant la période d'automne_____	81
Figure 4.8	Résultats de simulation de la première maison pendant la période d'hiver	82
Figure 4.9	Résultats de la simulation de la deuxième maison pendant la période d'hiver_____	83
Figure4.10	Résultats de simulation de la première maison pendant la période du printemps_____	84
Figure4.11	Résultats de la simulation de la deuxième maison pendant la période du printemps_____	85
Figure4.12	Résultats de simulation de la première maison pendant la période d'été____	86
Figure4.13	Résultats de simulation de la deuxième maison pendant la période d'été____	87
Figure4.14	Résultats de simulation de la première d'une usine_____	88
Figure4.15	Résultats de la simulation de la deuxième usine_____	89
Figure4.16	Résultats de simulation de la première maison_____	90
Figure4.17	Résultats de simulation de la deuxième maison_____	91
Figure4.18	Résultats de simulation de la troisième maison_____	92
Figure4.19	Résultats de simulation de la quatrième maison_____	93

Liste des tableaux

N° Tableau	Titre des tableaux	Page
Chapitre 1		
Tableau 1.1	Mesures des températures à la surface de la terre _____	05
Tableau 1.2	Réserves mondiales d'énergies et production annuelle 2017 par sources d'énergie _____	06
Tableau 1.3	Niveaux de tension normalisée _____	15
Chapitre 2		
Tableau 2.1	Caractéristiques du module PV Suntech STP080 12/B6 monocristallin _____	48
Tableau 2.2	Résultats de simulation pour un groupement série (Nss=3), Avec différentes températures et $G=1000\text{ W/m}^2$	51
Tableau 2.3	Résultats de simulation pour un groupement série (Nss=3), Avec différents éclairagements et $T=25^\circ\text{C}$ _____	52
Chapitre 3		
Tableau 3.1	Comparaison des communications avec et sans fil _____	66
Tableau 3.2	Comparaison des réseaux électrique classiques et du réseau électrique intelligent _____	66

Introduction générale

La situation énergétique mondiale est maintenant favorable à une insertion massive des énergies renouvelables dans les réseaux électriques. L'augmentation de la production d'énergie renouvelable et la déréglementation des marchés d'énergie électrique font naître, dans le domaine de la gestion et de l'exploitation des réseaux, des problèmes scientifiques et techniques nouveaux. Ces problèmes sont induits par l'insertion de nouvelles sources d'énergie dans les systèmes électriques, non conçus à priori pour les recevoir. L'une des conséquences de cette arrivée massive de nouvelles énergies est le changement de la structure des réseaux qui passera d'une structure hiérarchique avec des moyens de production conventionnels de grande taille et centralisés à une structure horizontale avec de la production décentralisée (notamment éolienne et solaire) dans les réseaux de distribution.

1. Evolution du système électrique

Le système électrique est constitué de moyens de production conventionnels (thermique, nucléaire, hydraulique), de moyens de production non conventionnels (éolien, photovoltaïque géothermie, et biomasse,), des réseaux de transport et de distribution.

En 2011 les énergies fossiles représentaient 79% de la production mondiale d'électricité et le nucléaire 7%. Les moyens de production conventionnels (centrales thermiques et nucléaires) sont adaptés au fonctionnement des systèmes électrique puisque leurs production est contrôlable mais ils utilisent les énergies qui présentent plusieurs inconvénients liés aux considérations environnementales :

- Réserves limitées,
- Émissions de gaz à effet de serre,
- Traitement des déchets (notamment nucléaires).

Ces considérations environnementales ont, en partie dictée, l'évolution des systèmes électriques vers une intégration massive des moyens de production non conventionnels et particulièrement de l'éolien et solaire qui font l'objet de notre travail. La part d'énergie éolienne dont la production mondiale est passée de 1,1% en 2000 (Papaefthymiou, 2006) à plus de 14% en 2011 et le parc solaire photovoltaïque, depuis 1998, a augmenté en moyenne de 35% par an dans le monde.

2. Description de la problématique

Ce succès, est accompagné de difficultés à court et moyen termes et pose des interrogations profondes à long terme. Ainsi, apparaît déjà les problèmes de couplage des perturbations entre les générateurs renouvelables et le réseau, ce qui se traduit souvent par des découplages intempestifs.

L'insertion d'une installation éolienne et solaire sur un réseau électrique peut entraîner des contraintes liées à différents aspects tels que :

- Courants en régime permanent et congestion de réseaux,
- Plan de tension,
- Courants de court-circuit,
- Plan de protection,
- Comportement dynamique et contribution aux services de réglage de tension et fréquence,
- Stabilité des fermes éoliennes et du réseau lors de défauts,
- Qualité de la tension, etc.

La réalisation d'études d'impact des énergies renouvelable sur les réseaux est donc nécessaire pour analyser ces contraintes, anticiper les problèmes liés au développement futur de ces énergies et rechercher des solutions appropriées. Ces études reposent en particulier sur la modélisation des unités de production d'électricité d'origine éolienne et solaire.

3. Objectif du Travail

Le gestionnaire de réseau se trouvera donc confronter à une série de difficultés qu'il ne peut dépasser sans moyen d'action sur les flux énergétiques liés à l'énergie renouvelable, soit de manière directe, ou par des incitations de types économiques (prime/pénalité) à l'égard des producteurs.

C'est dans cette perspective de contribution au développement des énergies renouvelables que s'inscrit notre thèse de doctorat. Pour diverses raisons, nous nous sommes particulièrement intéressés à cette problématique énergie renouvelable avec comme éléments exogènes, la puissance éolienne et solaire fournie et les exigences du gestionnaire réseau. Le système devra se conformer à la demande du gestionnaire en tenant compte de l'aléa éolien et solaire, des capacités de stockage/déstockage, des coûts énergétiques des transferts de flux et ce, en mettant en avant la rentabilité économique.

4. Organisation de la thèse

Cette thèse a été scindée en 4 chapitres :

Le premier chapitre aborde l'étude sous une forme assez descriptive. En effet, nous décrivons le contexte et les enjeux de la maîtrise de l'énergie, ainsi que les différentes approches pour y parvenir. Dans un premier temps, le contexte énergétique et environnemental au sein duquel s'inscrivent les travaux présentés est analysé. Il a été constaté un réchauffement climatique mondial, avec notamment une élévation de la température moyenne à la surface de la Terre, dû à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, ensuite, par quelques chiffres, nous montrons l'importance et l'évolution dans le temps de la production renouvelable mondiale d'origine éolienne et solaire.

Le second chapitre présente quelques principes généraux et la modélisation de l'ensemble des éléments d'un réseau électrique constitués de systèmes photovoltaïque et éolien.

Le troisième chapitre traite des réseaux intelligents dans un contexte de génération future et pour valoriser cet objectif, nous considérons un nouveau modèle de système hybride combinant l'énergie solaire et éolienne. Afin d'automatiser et d'assurer une large distribution du réseau de transport et de distribution, nous envisagerons le transfert bidirectionnel d'électricité et une solution d'information.

Le quatrième chapitre est réservé à un nouveau modèle de système hybride PV / WT connecté au réseau électrique est développé. Le réseau intelligent, considéré comme le réseau électrique de la prochaine génération, utilise un flux bidirectionnel d'électricité et d'information pour créer un réseau de distribution d'énergie automatisé largement distribué.

Enfin, comme il est d'usage, la conclusion de ce travail ainsi que quelques perspectives pour l'améliorer sont avancées. Les données du système éolien, solaire et quelques notions théoriques sont regroupés dans les annexes de cette thèse.

1.1 Introduction

Face à la difficulté d'approvisionnement en énergies fossiles ainsi qu'au problème lié au réchauffement climatique que connaît le monde actuellement et de l'augmentation de la température causée principalement par des émissions de gaz à effet de serre lié principalement aux activités industriels, le monde est dans l'obligation de faire face à la diminution des énergies fossiles afin de les préserver aux générations futures étant donné que la consommation mondiale ne cesse de croître. Il est dans l'obligation d'imposer un développement durable qui peut garantir l'énergie à l'humanité. Et préserver l'environnement.

Des solutions sont mises en œuvre pour réduire les émissions de gaz à effets de serre en développant les énergies renouvelables notamment les énergies solaire et éolienne afin qu'ils remplacent les énergies conventionnels étant donné que ces énergie sont inépuisables.

Ce chapitre va détailler les causes du réchauffement climatique et les solutions envisager pour les réduire. Nous allons commencer par énumérer les différents types d'énergie renouvelables, ensuite nous allons nous intéresser plus particulièrement à l'état de l'art sur les projets de micro-réseaux et l'intégration de la génération d'électricité décentralisée.

1.2 Notion générale

1.2.1 Réchauffement climatique

Les principales causes de l'augmentation de la température sur la surface de la terre sont les émissions de gaz à effets de serre excessives. Ces derniers dépassent la capacité requise d'absorption des océans et de la biosphère et élève l'effet de serre, lequel font augmenter la chaleur à la surface terrestre. Le réchauffement climatique est observé depuis le début du XXe siècle avec l'apparition de l'ère industrielle [1].

1.2.2 Augmentation des températures

Au cours du XXe siècle, les mesures de température sur la terre montre une augmentation de la température sur la surface terrestre. On a constaté en mesurant en divers points de la terre que l'écart entre la température mesuré et la température prise comme référence est plus grand c'est-à-dire une augmentation de la température en calculant la moyenne pondérée des écarts. Le réchauffement planétaire est plus important avec une forte augmentation dans l'atmosphère des gaz à effets de serre [1].

Le Groupe Intergouvernemental des Experts du Climat (GIEC) a estimé que l'élévation de la température moyenne à la surface de la terre entre 1901 et 2012 est estimée à 0,9°C avec une probabilité de 90 % pour que le réchauffement soit compris entre 0,69 °C et 1,08 °C. Le

début du XXI^e siècle a été le plus chaude depuis la mise en place des systèmes de relevés de température et chacune des trois dernières décennies de 1980 à 2010 a été plus chaude à la surface de la Terre que toutes les années précédentes depuis 1850 (tableau 1.1). Le réchauffement climatique n'a cessé d'augmenter de 1980 à nos jours [2].

Années	Mesures des températures à la surface de la terre Ecart / moyenne
1998	+0.83 °C
2005	+0.87 °C
2007	+0.85 °C
2009	0.79 °C
2010	+0.91 °C
2013	+0.81 °C
2014	+0.88 °C
2015	+0.98 °C
2016	+1.25°C
2017	+1.13 °C

Tableau 1.1 : Mesures des températures à la surface de la terre [1]

1.2.3 Causes d'augmentation de la température

On trouve dans l'atmosphère terrestre des gaz à effet de serre, ces derniers captent les rayons émis par le soleil et les renvoient dans la nature terrestre sous forme de rayons infrarouge, par conséquent l'effet de serre participe au réchauffement de la terre. Etant donné que ces gaz rejetés principalement par les activités de l'Homme qui sont en abondance dans l'air ces derniers années ce qui pose un problème de climat et d'environnement.

On peut citer plusieurs gaz à effet de serre dont les principaux sont figure (1.1) [3]

- L'homme est responsable de plus de 70% de dioxyde de carbone issu essentiellement de la combustion des énergies fossiles.
- Le protoxyde d'azote représente 16% des gaz à effet de serre dont les activités agricoles sont principales causes.
- Le méthane constitue 12% des gaz à effet de serre, provient principalement de l'agriculture et aussi impliqué dans les énergies fossiles

Les gaz comme le fluorés (l'Hydrofluorocarbures, Per fluorocarbures, l'Hexafluorure de soufre) ne représentent que 2% de gaz à effet de serre, ils sont issues de l'utilisation des systèmes de réfrigération et proviennent des mousses isolantes et les aérosols [1]

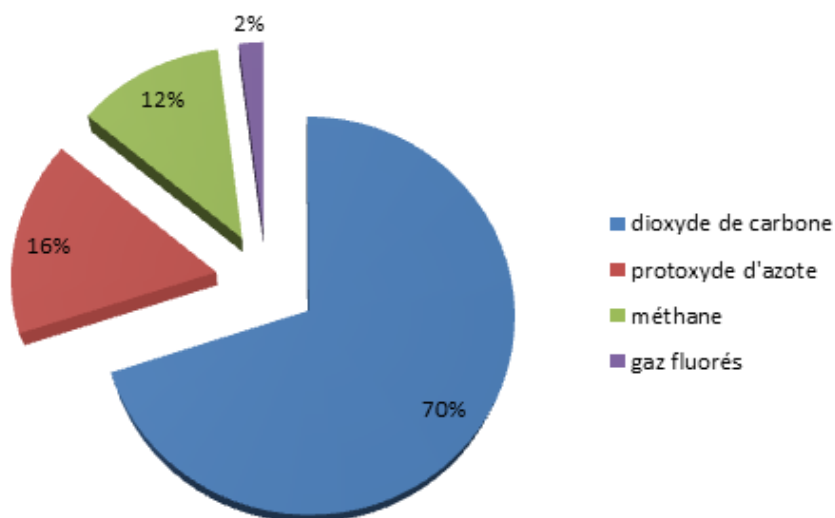


Figure 1.1 : Les principaux gaz à effet de serre

1.2.4 La limite des réserves mondiales d'énergies

	Réserves mondiales (en unité)	Reserve mondiales (en Gtep)	Production annuelle (en Gtep)	Nombre années de production à ce rythme
Pétrole	1 734 Gbbi	237	4.5	50
Gaz naturel	199 Tm ³	179	3.6	50
Charbon	1 070 Gt	606	4.5	132
Total fossiles		1 022	12.6	82
Uranium	6.14 Mt	77	0.60	128
Thorium	6.4Mt	80	ns	Ns
Total conventionnel		1 179	13.2	85
Hydroélectrique	8.9PWh/an	2.0 (par ans)	2.25	Ns
Energie éolienne	39PWh/an	8.8 (par ans)	0.31	Ns
Solaire	1 070 000	92 000 (par ans)	0.16	Ns
Biomasse	3X10 ²¹ j /an	70 (par ans)	1.32	Ns

Table 1.2 : Réserves mondiales d'énergies et production annuelle 2017
par sources d'énergie [1]

D'après British petroleum, on estime les réserves mondiales d'énergie non renouvelable combustible fossiles et l'énergie nucléaire pouvaient être en 2019 [3] à 1 187 milliards de tonnes d'équivalent pétrole (tep), soit une exploitation de 85 ans de production au rythme actuel. Elle varie selon énergie exploitée, les prévisions de la durée de vie du pétrole et de gaz naturel sont estimés à 50 ans, par contre celle du charbon est de 130 ans, l'uranium est de 128 ans. Si on les compare avec de l'énergie solaire ; cette dernière est estimée à vingt fois la consommation mondiale annuelle tableau 1.2.

1.2.5 Début de la fin des ressources énergétique fossile

D'après British petroleum, La production mondiale d'énergie commercialisée était en 2019 de 584,9 Exajoule, avec une augmentation de 12,1% depuis 2009. On estime la production d'énergie électrique à partir du pétrole de 33,1 %, de charbon, 24,2 % de gaz naturel, 4,3 % de nucléaire et 11,5 % d'énergies renouvelables (hydroélectricité 6,5 %, éolien 2,2 %, biomasse et géothermie 1,0 %, solaire 1,1 %, agro-carburants 0,7 %) [4].

L'augmentation de la consommation énergétique mondiale provoque une situation préoccupante pour la sécurité de l'approvisionnement en énergie. Les réserves du pétrole devraient disparaître à partir de l'an 2030 et du gaz à compter de 2050.

1.3. L'énergie électrique non renouvelable

1.3.1. L'énergie thermique

A partir du fluide, l'énergie thermique provenant de la combustion des carburants fossiles est utilisée pour faire tourner une turbine qui sert à entraîner un générateur. La génération de l'électricité par un générateur thermique est bien connue depuis longtemps on utilise du charbon, du gaz naturel et du fioul comme matières premières. Par contre les centrales nucléaires l'énergie thermique est issue de la fission des noyaux nucléaires. Ce sont des générateurs d'énergie non-renouvelable, parce que le minerai utilisé, l'uranium, est une ressource épuisable et non-renouvelable. Ces centrales ne génèrent pas une pollution lors de leur exploitation, mais en cas d'accident présentent un risque énorme pour l'environnement et les êtres vivants. [5].

Il existe d'autre technologie de centrale thermique avec une turbine à gaz entraînant des générateurs.

- Cycle simple, la turbine à gaz entraîne une génératrice, la chaleur dégagée en surplus disparaît dans la nature.

- Cycle combiné, la chaleur des gaz d'échappement est récupérée à travers une chaudière, elle sert soit pour le chauffage, soit pour entrainer un autre couple turbo-alternateur ; Le rendement de la centrale peut atteindre plus de 60%.

On peut citer aussi des petites centrales avec des turbines à gaz, ils sont utilisés dans les micro-turbines à gaz, la puissance de sortie est entre 30kW et 300kW. On peut les utiliser pour l'alimentation des sites isolés [5].

1.3.2. L'énergie par piles à combustion

Christian Schönbein a découvert le principe de fonctionnement de la pile à combustible au début du 19^{ème} siècle. Ensuite, William Grove a élaboré, le premier prototype du fait que la technologie nécessite des matériaux coûteux et sophistiqués, le développement des piles à combustible s'est vu ressusciter à la moitié du 20^{ème} siècle [6].

La fabrication de l'électricité se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur, on peut citer le dihydrogène, couplée à la réduction sur électrode d'un oxydant, le dioxygène de l'air. La réaction d'oxydation de l'hydrogène est accélérée par un catalyseur souvent en platine. Ce principe est l'inverse de l'électrolyse. Les produits de la réaction chimique, effectuée dans la pile à combustible sont l'électricité, la chaleur et l'eau [1].

Des piles à combustible, contenant des membranes en polymères avec des petites quantités de platine sont utilisées sur les satellites depuis les années soixante-dix. Des chercheurs ont proposé d'intégrer un catalyseur supplémentaire, afin de diminuer la quantité de platine des piles à combustibles. Il s'agit de nano sphères construites avec des atomes de platine et de cuivre, dont les particules de cuivre sont par en partie extraites, laissant une sorte de nano coquille de platine de quelques atomes d'épaisseur [6]

Ce procédé est appliqué à d'autres métaux pour produire d'autres types de catalyseurs pouvant permettre une production d'hydrogène et d'oxygène à partir de l'eau. De cette manière, un stockage chimique de l'énergie électrique est réalisé. Les piles à combustibles sont les moins utilisées, à cause de leurs prix. Ils sont utilisés principalement dans les laboratoires de recherche et des applications spatiales. Pour ce dernier, le rendement global reste encore relativement faible, en raison des pertes [1].

1.4 L'énergie électrique renouvelable

Toutes les énergies renouvelables à l'exception de l'énergie marémotrice et géothermique, vient finalement du soleil [8]

On peut citer les différentes techniques des énergies renouvelables et d'où proviennent:

- Du soleil, dont le rayonnement est le vecteur de transport de l'énergie thermique et photonique
- Du vent : énergie éolienne
- Du cycle de l'eau : hydroélectricité
- De l'océan : vagues (énergie houlomotrice), courants (énergie hydrolienne), différence de température (océan thermie ou énergie thermique des mers)
- De la terre, de sa chaleur interne, la géothermie
- Du système terre-lune, avec l'énergie marémotrice;

En sachant qu'à la racine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du Soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre. Etant donné que l'énergie mécanique est très difficilement transportable. Cette énergie, est donc majoritairement transformée en énergie électrique. A l'exception de la biomasse et de l'hydraulique, l'autre inconvénient majeur des énergies renouvelables est issu de la non régularité des ressources. A l'opposé, les fluctuations de demande en puissance selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément en phase avec les ressources [2].

Les inconvénients majeurs de l'utilisation massive des énergies renouvelables dans le monde se résument comme suite :

- Les énergies éolienne et solaire sont dépendantes de la météo et de l'environnement
- Ils sont des sources intermittentes.
- Matériaux coûteux

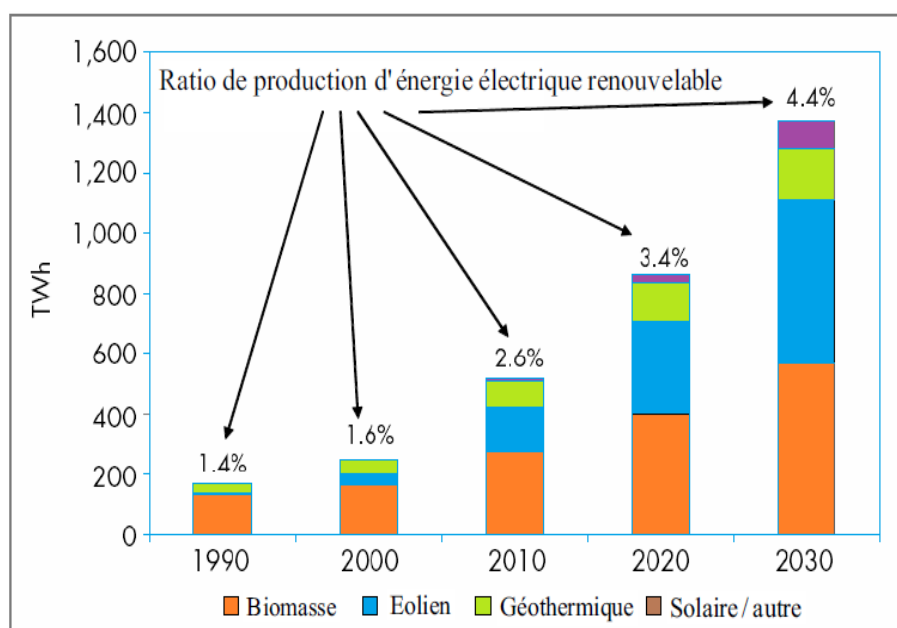


Figure 1.2 : Production mondiale d'électricité basée sur les énergies renouvelables [9].

1.4.1 L'énergie hydraulique

Actuellement, l'énergie produite à partir d'hydraulique est la première source renouvelable d'électricité. On peut discerner de petite hydraulique (inférieure à 10 MW) et la grande hydraulique (supérieure à 10 MW). Dans le cadre de la production décentralisée on utilise essentiellement la petite hydraulique [10].

L'hydraulique est constituée en grande partie par des centrales au fil de l'eau ce qui les rend fortement dépendantes du débit des cours d'eau.

1.4.2 L'énergie de la biomasse

L'énergie de la biomasse est répartie en quatre catégories on peut citer [11]:

- La biomasse sèche (bois, déchets agricoles...),
- Le biogaz, les déchets municipaux renouvelables solides
- La biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...).

1.4.3 L'énergie de la géothermie

L'énergie de la géothermie est répartie en trois catégories selon le niveau de température disponible à l'exploitation on peut citer [3]:

- La géothermie à haute énergie qui exploite des sources hydrothermales très chaudes, ou des forages très profonds où de l'eau est injectée sous pression dans la roche. Cette géothermie est surtout utilisée pour produire de l'électricité [12].
- La géothermie de basse énergie : géothermie des nappes profondes aux températures situées entre 30 et 100 °C. Sa principale utilisation est appliquée pour les réseaux de chauffage urbain.
- La géothermie de très basse énergie : géothermie des faibles profondeurs aux niveaux de température compris entre 10 et 30°C. Sa principale utilisation est le chauffage et la climatisation individuelle

1.4.4 L'énergie solaire

Aujourd'hui, La conversion photovoltaïque, largement utilisée, peut-être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Le capteur utilisé se présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule nommée cellule photovoltaïque. La quantité d'énergie électrique ainsi générée peut varier en fonction du matériau utilisé, des paramètres géométriques du capteur et de sa capacité à collecter les électrons avant qu'ils ne se recombinent dans le matériau. Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'extrayant littéralement de la matière. Ce

dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique. Généralement, la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique [13].

La production de L'énergie solaire est utilisée selon plusieurs choix [14] :

- L'énergie solaire thermique: qui consiste à produire de la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut aussi produire avec la vapeur de la chaleur du soleil et la convertir en électricité.
- L'énergie solaire photovoltaïque: qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires.
- L'énergie solaire passive: est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage.

1.4.5 L'énergie de la mer

L'énergie des vagues est une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe les différentes couches atmosphériques ce qui provoque des vents qui responsables par frottement des mouvements et qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues). Les vagues créées par le vent à la surface des mers, transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant électrique [15].

On peut citer trois grandes familles de systèmes :

- Rampe de déferlement ou overtopping [16],
- Colonne d'eau oscillante ou OWC
- Les flotteurs articulés [4] ou les flotteurs sur ancrage [5].

1.4.6 L'énergie éolienne

Depuis l'avènement des moulins à vent jusqu'aux premiers aérogénérateurs, la technologie des éoliens a connu une évolution fulgurante surtout ces dernières décennies ; notamment dans le domaine de la production d'énergie électrique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et leurs structures sont de plus en plus performantes [6]. Les caractéristiques mécaniques, et l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. En effet, il existe deux types d'éoliennes à savoir les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal [7]. Les

éoliens les plus utilisés sont à axe horizontal, elles sont rapide et elles sont les plus répandues, mais aussi les plus efficaces [8].

1.5 Aperçu historique et consommation des énergies renouvelables

1.5.1 Aperçu historique de l'éolien

En premier lieu l'homme a exploitée l'énergie du vent, Elle fut utilisée pour la propulsion des navires, les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau [17]. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J.-C environ. Les moulins à vent sont visibles partout en Europe, dès le XIV^{ème} siècle, et deviennent la principale source d'énergie [9]

Lord Kelvin en a songé pour la première fois à transformer l'énergie éolienne en énergie électrique en 1802, mais il faudra attendre 1850 et l'avènement de la dynamo pour qu'on puisse voir ce que l'on appellera les aérogénérateurs.

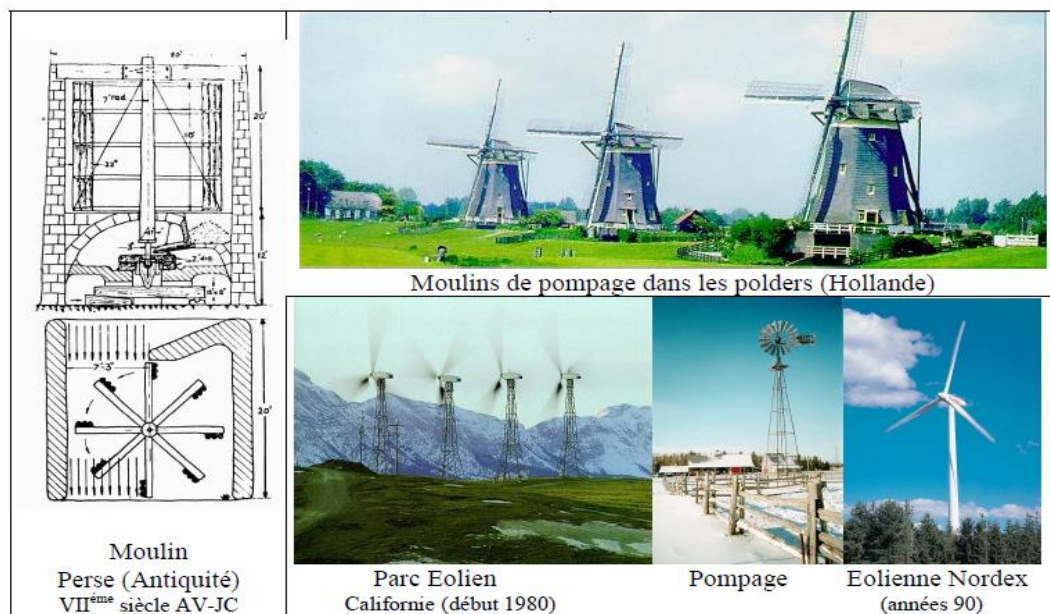


Figure 1.3 : Evolution des dispositifs éoliens de l'Antiquité à nos jours [18]

1.5.2 Aperçu historique de l'énergie solaire

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque signifie donc littéralement électricité lumineuse [15].

Le scientifique français, Edmond Becquerel, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photoélectrique. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière [19].

1.5.3 Consommation des énergies renouvelables dans le monde

Ces dernières années la consommation mondiale d'énergie ne cesse de croître d'année en année pour atteindre des chiffres plus élevés (figure 1.4) [20]. ce qui pose un problème d'approvisionnement qu'on ne peut le résoudre sans passer par les énergies renouvelables seule issue de secours pour la continuité du service et garantir un avenir pour l'humanité qu'elle a besoin d'énergie électrique au futur [21-24].

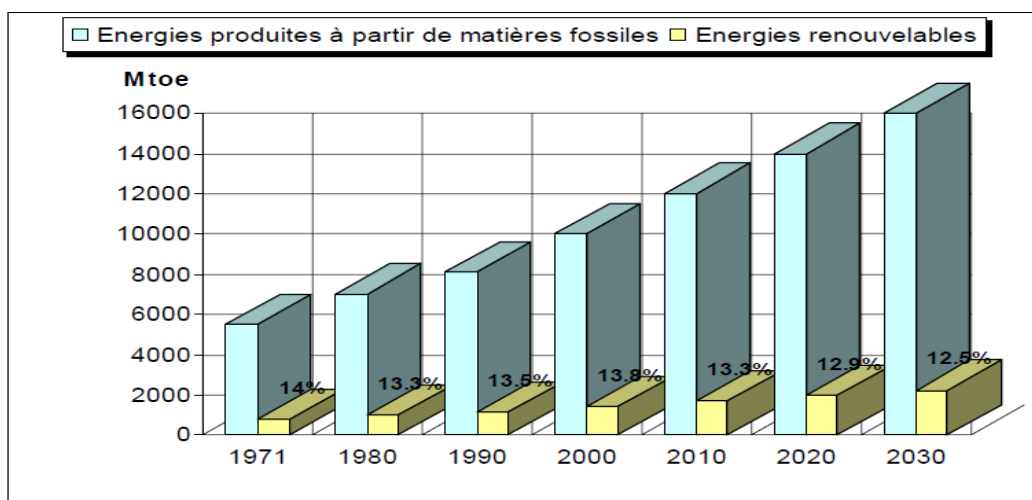


Figure 1.4 : Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions [25]

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire. La figure (1.5) montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles [10].

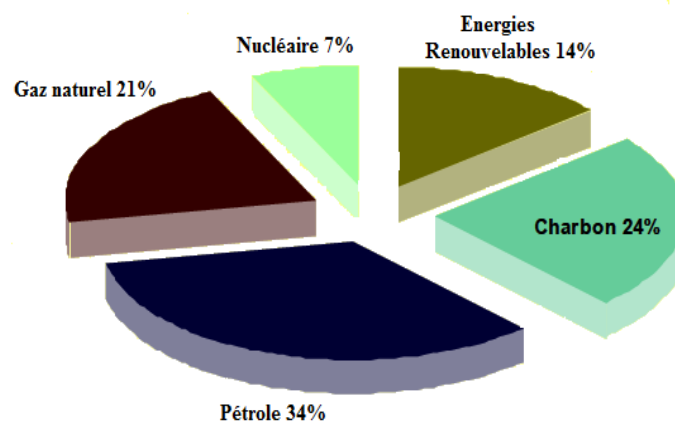


Figure 1.5 : Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde

1.6. Architecture des systèmes électriques

1.6.1 Fonctionnement

Les réseaux électriques sont organisés en trois niveaux différents :

Au niveau des centrales de production d'énergie électrique on trouve les alternateurs synchrones de grandes tailles entraînés par des turbines à vapeur, à gaz ou hydrauliques. Elles sont connectées sur le réseau de transport à haute tension par des transformateurs élévateurs. Leur puissance nominale est de l'ordre de quelques dizaines de MW jusqu'à quelques GW pour acheminer l'énergie électrique jusqu'aux réseaux de distribution alimentant la plupart des consommateurs (figure 1.6) [27-26].

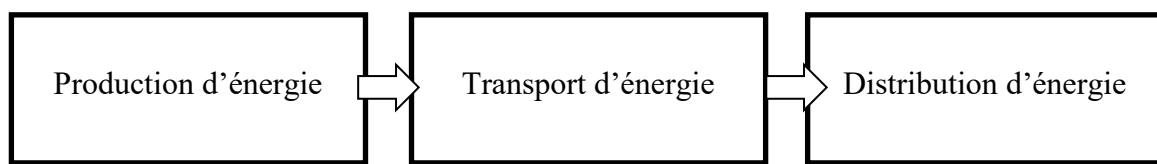


Figure 1.6 : *Architecture traditionnelle du système électrique [1]*

1.6.2. Les réseaux de transport

La principale fonction des réseaux de transport c'est d'acheminer l'énergie électrique sur des grandes distances aux consommateurs avec des hautes et très hautes tensions de l'ordre de 63 KV à 450 KV. Ils ont une structure maillée afin d'éviter une congestion forte sur une seule branche. Les réseaux de transport sont supervisés et automatisés [28]

1.6.3. Les réseaux de distribution

La fonction principale des réseaux de distributions c'est l'approvisionnement de l'énergie électrique aux consommateurs. Ils ont une tension inférieure à 50 kV (HTA). Ils existent de deux types de réseaux: le réseau moyenne tension (MT), qui sert comme interface avec le réseau de transport et le réseau basse tension (BT). La plupart des pays ont une tension de réseau BT de l'ordre de 400V. Les appellations normalisées des niveaux de tension sont présentés sur le tableau 1.3.

Les réseaux de distributions sont raccordés au réseau MT à travers des postes de transformation HTA/BT. Les consommateurs sont appelés charges. Ils sont caractérisés par leurs puissances active et réactive consommées ou produites. Ces puissances mesurées sur un certain intervalle de temps servent à déduire les puissances moyennes, maximales et minimales [11].

Tension	U<50V	50V < U	500V < U <	1kV < U <	50kV < U <	U>100 kV
Norme		< 500V	1kV	50kV	100kV	
Avant 1989	TBT	BT		MT	HT	THT
Après 1989	TBT	BTA	BTB	HTA	HTB	

Tableau 1.3 : Niveaux de tension normalisée

1.6.4. Contrôle et suivi des réseaux électriques

Cette action est assurée par un système capable de superviser et de piloter les réseaux électriques à distance. Le centre de dispatching de l'énergie électrique veille à ce que la répartition des puissances électriques se fait équitablement dans toutes les régions du pays en se basant sur l'équilibre à instaurer entre la production et la consommation [29].

Les informations mesurées sur les nœuds du réseau de transport et les postes de transformation sont collectées au niveau des centres de dispatching qui les traitent par un système de collecte. Le traitement des informations et la supervision se fait au niveau du SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Ensuite, les données sont visualisées et finalement interprétées par des opérateurs responsables de la supervision des réseaux.

Le réglage de la tension se fait au niveau du centre de dispatching. La tension est réglée par transformateurs réglables et la puissance réactive est générée ou absorbée par des équipements tels que les compensateurs synchrones ou statiques [10]. Chaque réseau règle ses niveaux de tension. Les réseaux de distribution possèdent peu de flexibilités et d'automatisme pour le faire actuellement et les dynamiques de réglage sont très lents.

1.7 Nécessité des réseaux électriques intelligents

Depuis longtemps, l'homme cherchait à subvenir ses besoins temporaires. Avec le temps il commençait à chercher des solutions pour préserver toutes sortes d'énergie plus longtemps que possible. Malheureusement cette énergie non renouvelable n'est pas toujours disponible vu l'épuisement des ressources énergétiques traditionnelles. En plus des enjeux liés au réchauffement climatique, le recours aux énergies renouvelables, devient une nécessité primordiale pour la survie de l'humanité.

Le développement et l'exploitation des ressources renouvelables et des systèmes de production décentralisés d'origine renouvelable ont connu une forte croissance ces dernières années. Leurs fonctionnements ne polluent ni l'atmosphère ni le sol ni l'eau et convertissent en

électricité une ressource abondante, gratuite et illimitée à l'échelle humaine. La demande importante et croissante de l'énergie ainsi que les préoccupations environnementales liées aux gaz à effet de serre poussent les entreprises à se tourner vers l'énergie renouvelable comme une alternative pour le futur.

Le réseau électrique intelligent est une solution au problème liée à la disparition des énergies non renouvelables et l'environnement, c'est un réseau de distribution d'électricité qui utilise des technologies informatiques de manière à optimiser et coordonner la production, la distribution et la consommation d'électricité afin d'améliorer l'efficacité énergétique et la fiabilité de ce système. Les nouvelles technologies permettront de faire des économies en lissant les pointes de consommation en utilisant la production décentralisée et ainsi de diminuer les appels aux capacités qui sont coûteuses et plus polluantes. De cette manière l'alimentation des consommateurs sera plus fiable et le coût de l'énergie électrique pourrait être réduit [11].

1.8 Les micro-réseaux

On désigne un micro-réseau un ensemble local de consommateurs et petits producteurs d'énergie électrique, qui fonctionne en régime connecté au réseau de distribution. Du point de vue de l'opérateur du réseau. Il agit comme une seule unité en tant que producteur ou consommateur d'électricité. Ceci est réalisable à l'aide d'une supervision intelligente intégrée dans le micro-réseau. Le concept de micro-réseau seul ou en interaction avec d'autres micro réseaux ou le réseau de distribution fait partie du réseau intelligent. Un ensemble de micro-réseaux, coexistant et interagissant entre eux, dans les limites d'une ville, forme une ville intelligente.

Les villes intelligentes sont des villes visant avant tout à gérer de façon plus efficace leur consommation d'énergie et celles de leurs administrés. Cela passe, notamment, par une optimisation locale des sources d'approvisionnement et de consommation d'énergie [36], et ce à différents pas de temps, et une gestion plus intelligente des réseaux et de l'équilibrage entre la production et la consommation pour faciliter l'insertion des énergies de sources d'énergies renouvelables [30].

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'état de l'art sur les projets liés aux réseaux électriques ainsi que l'intégration de la génération d'électricité décentralisée. Il est évident d'indiquer l'accroissement de la consommation énergétiques mondiales et les changements climatiques qui sont les raisons principales de la recherche de nouvelles technologies de

génération d'électricité. Cette solution donne une indépendance totale des carburants fossiles et ne pollue pas l'environnement. Les sources d'énergie renouvelable peuvent jouer un rôle principal pour satisfaire une grande partie des besoins énergétiques de l'humanité. Etant donné que les secteurs résidentiel et industriel sont parmi les plus grands consommateurs d'énergie électrique, l'apparition de la production d'électricité décentralisée est devenue une contribution importante pour assurer partiellement ou une bonne partie des besoins énergétiques des consommateurs.

2.1 Introduction

Le processus d'alimentation en énergie électrique est une installation complexe assumant un objectif fonctionnel de haut niveau (production, transport et distribution). Pour assurer cet objectif fonctionnel de haut niveau, le processus fait appel à un ensemble de systèmes interconnectés. Chaque système assure une ou plusieurs fonctions bien définies.

L'électricité produite par les générateurs renouvelables doit être acheminée via un réseau électrique de grande ou petite envergure vers les centres de consommation. Ce chapitre présente quelques principes généraux et la modélisation de l'ensemble des éléments constitués de systèmes photovoltaïque et éolien.

2.2 Modélisation de la chaîne de production éolienne

Pour faciliter la modélisation, on va diviser le système éolien en trois parties principales (La partie aérodynamique, la partie mécanique et la partie électrique), comme il est montré par la figure (2.1).

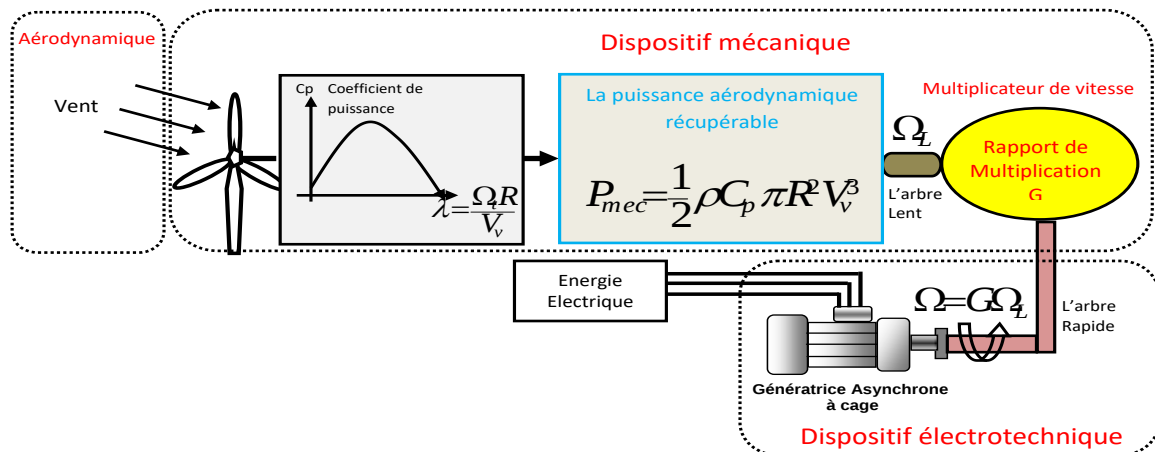


Figure 2.1 : Schéma macroscopique d'un aérogénérateur éolien.

2.2.1. Caractéristiques du vent : aspects aérodynamiques

2.2.1.1 Loi de Betz.

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent [31]. En effet, si nous considérons une masse d'air, m , qui se déplace avec la vitesse V , l'énergie cinétique E_c de cette masse est :

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2 \quad (2.1)$$

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface S , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent V_v représenté sur la (Figure 2.2), la puissance instantanée fournie serait, alors :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V_v^3 \quad (2.2)$$

Ou :

ρ : La densité de l'air (1.22 kg/m^3 à la pression atmosphérique à 15°).

P_v : Puissance incidente sur le rotor

La formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde, (voir Annexe A).

$$P_{\text{max}} = \frac{16}{27} P_v = 0.59 P_v \quad (2.3)$$

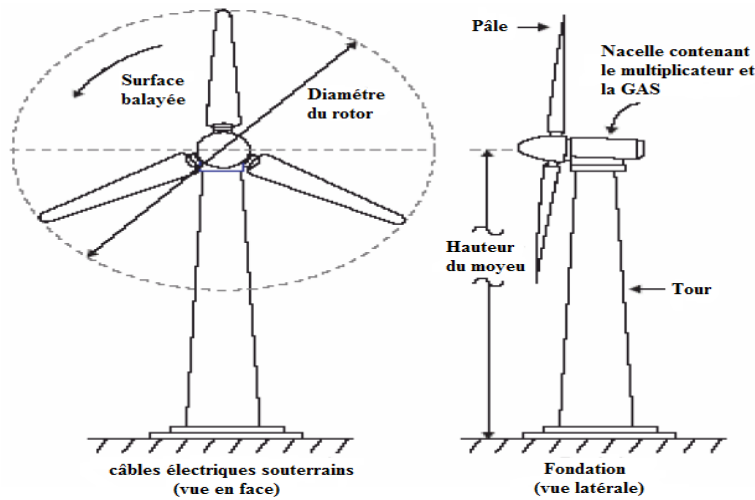


Figure 2.2 Schéma d'une éolienne [31].

De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_p^{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{P_v} = \frac{2P_{\text{max}}}{\rho S V_v^3} = 0.59 \quad (2.4)$$

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de cette puissance maximale théorique peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient de puissance C_p de l'éolienne. Ce coefficient lie la puissance éolienne $P_{\text{éol}}$ à la vitesse du vent :

$$C_p = \frac{2P_{\text{aé}}}{\rho S V_v^3} \quad (2.5)$$

La valeur du coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ est illustré sur la figure (2.3) :

$$C_p = C_p(\lambda) \quad (2.6)$$

Avec

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \quad (2.7)$$

Où :

Ω : La vitesse linéaire périphérique en bout de pale de l'hélice.

R : Rayon de l'aéro-turbine

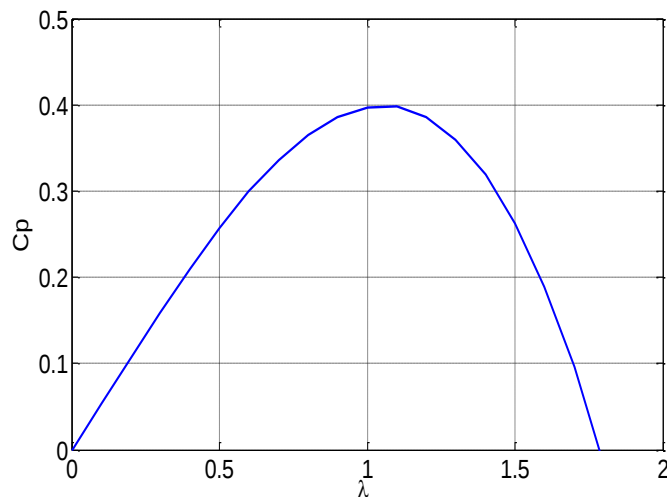


Figure 2.3 : Coefficient aérodynamique de puissance.

2.2.1.2 Modèle du vent

La ressource en vent, du point de vue de sa distribution statistique, est primordiale dans un projet éolien et donc déterminante pour le calcul de production de l'électricité et de sa rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent.

La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent dans l'axe vertical n'a pas d'importance du point de vue de la voilure éolienne car elle n'est pas vue par sa surface active. Par simplification, le vecteur vitesse évolue dans le

plan horizontal. Les voilures à axe vertical sont dépourvues de tout dispositif d'orientation des pâles (la surface active est toujours en face du vent), alors le modèle du vent comportemental est simplifié considérablement. La vitesse du vent peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps [32] :

$$V_v = f(t) \quad (2.8)$$

La vitesse du vent sera modélisée, dans cette étude, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme :

$$V_v(t) = A + \sum_{n=1}^N (a_n \sin(b_n \omega t)) \quad (2.9)$$

L'évolution temporelle du vent tracée dans la (figure 2.4) est donné par l'équation suivantes :

$$V_v(t) = 10 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad (2.10)$$

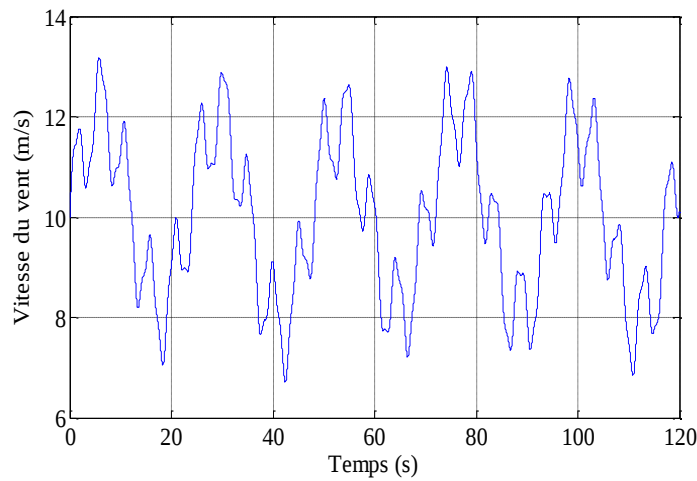


Figure 2.4 : Vitesse du vent en fonction du temps.

2.2.2 Partie Mécanique

2.2.2.1 Modèle de la turbine

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée, comprend trois pâles orientables de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω_{turbine} qui est relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (figure 2.5) [35-33].

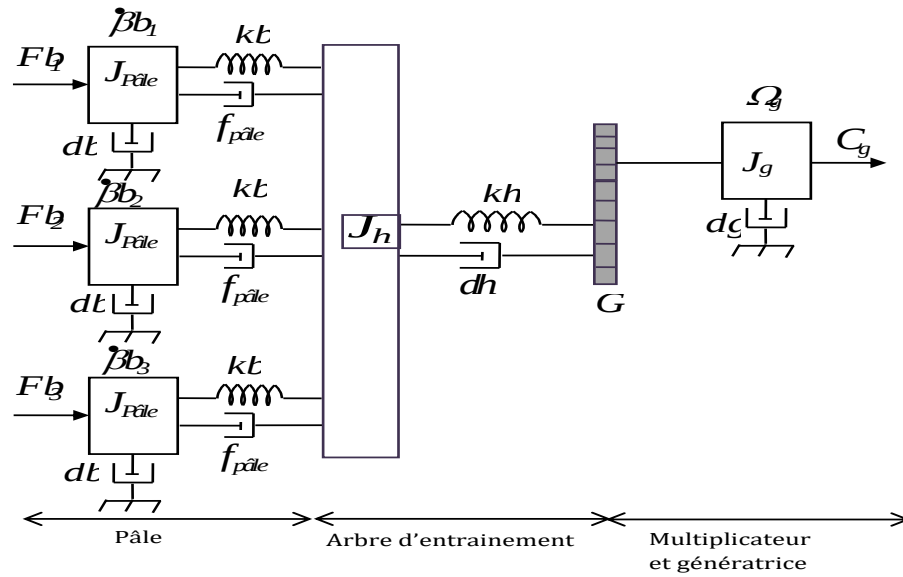


Figure 2.5 : Système mécanique de l'éolienne.

2.2.2.1.1 Hypothèses simplificatrices.

Pour rendre ce modèle simple on prend les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les pâles sont considérées à conception identique avec les mêmes paramètres d'inertie J_{pal} , d'élasticité kt et le même coefficient de frottement par rapport à l'air dt :
- Ces pâles sont orientables et possèdent un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pal} .
- Les vitesses d'orientations de chaque pôle sont notées $\beta b_1, \beta b_2, \beta b_3$.
- Chaque pôle reçoit une force Fb_1, Fb_2, Fb_3 qui dépend de la vitesse du vent, qui lui appliquée.
- L'arbre d'entraînement des pâles est caractérisé par : son inertie J_h , son élasticité kh , son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur D_h .
- Le rotor de la génératrice possède une inertie J_g et un coefficient de frottement d_g .
- Les coefficients des frottements des pâles par rapport à l'air et par rapport au support sont très faibles et peuvent être négligés.
- La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pâles, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.

Le modèle mécanique simple de la turbine est représenté par la figure (2.6) [33].

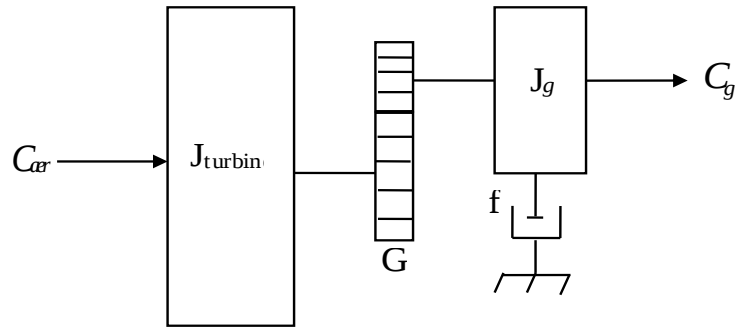


Figure 2.6 : *Modèle mécanique de la turbine éolienne.*

2.2.2.2 Modèle des pâles

La figure (2.7) représente le profil aérodynamique des pâles qui sont orientables et possèdent un même coefficient de frottement par rapport au support.

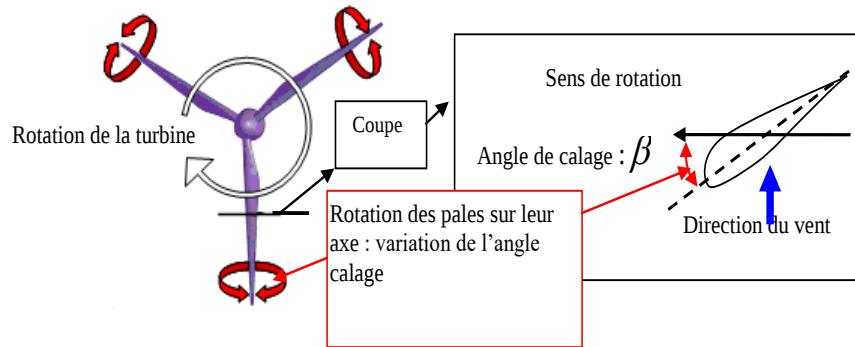


Figure 2.7 : *Profil aérodynamique d'une pale.*

La puissance cinétique du vent est donnée par :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V_v^3 \quad (2.11)$$

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique.

Son couple aérodynamique C_{aero} est donné par l'expression suivante :

$$C_{aero} = \frac{1}{2\Omega} C_p(\lambda, \beta) \rho S V_v^3 \quad (2.12)$$

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit comme suit :

$$P_{aero} = C_p(\lambda, \beta) P_v = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho S V_v^3}{2} \quad (2.13)$$

Avec :

Ω : Vitesse de la turbine,

ρ : Densité de l'air, $\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$.

S : Aire balayée par la turbine, $S = \pi R^2$

V_v : Vitesse du vent.

C_p : Coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine (figure (2.8)). Il dépend des caractéristiques de la turbine (les dimensions de la pôle, le rapport de la vitesse λ et l'angle d'orientation de la pôle β).

Un exemple du coefficient de puissance qui est une fonction non linéaire dépend à la fois de l'angle de calage β et de la vitesse relative a pour expression [12-36] :

$$C_p = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-225}{\lambda}}$$

Tel que :

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

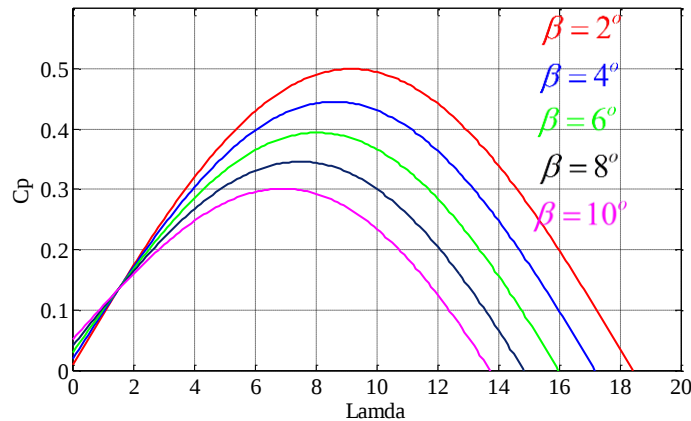


Figure 2.8 : Coefficient aérodynamique en fonction du rapport de vitesse de la turbine

Pour une éolienne de 1.8 W, l'expression du coefficient de puissance est donnée par

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 - 0.167(\beta - 2) \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 1)} \right] - 0.001(\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (2.14)$$

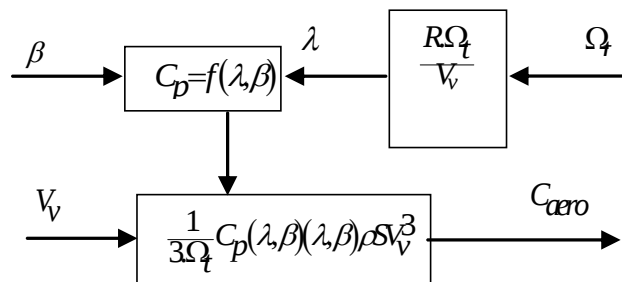


Figure 2.9 : Schéma bloc du modèle des pôles.

2.2.2.3 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par l'équation suivante [13].

$$C_{turbine} = \frac{C_{générateur}}{G} \quad (2.15)$$

Avec :

G : Gain de multiplicateur.

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur

$$C_{turbine} = \frac{C_{générateur}}{G} \quad (2.16)$$

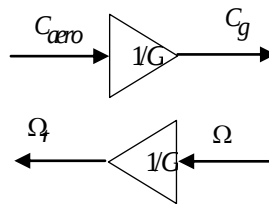


Figure 2.10 : Schéma bloc du modèle du Multiplicateur de vitesse.

2.2.2.4 Modélisation de l'arbre de la machine

Plusieurs modèles mécaniques pour modéliser l'arbre sont proposés dans la littérature. Nous avons adopté un modèle simplifié qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne dans son ensemble, la figure (2.11) représente le schéma Simulink du modèle de l'arbre de la machine [13].

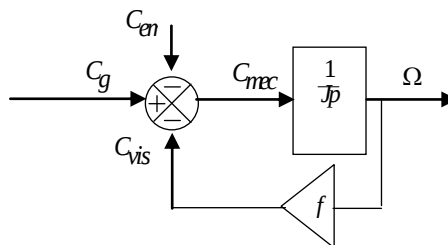


Figure 2.11 : Schéma bloc du modèle de l'arbre mécanique.

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par :

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega}{dt} = C_{\text{aéro}} - C_{em} - (f_m - f_t) \Omega \quad (2.17)$$

Avec :

$$J = J_t + G^2 J_m \quad (2.18)$$

$$f = f_t + G^2 f_m \quad (2.19)$$

Où :

J_t : Inertie de la turbine.

J_m : Inertie de la machine.

f_m : Coefficient de frottement de la machine.

f_t : Coefficient de frottement des pâles.

$C_{\text{aéro}}$: Le couple statique fournie par l'éolienne.

Le schéma bloc représente le modèle de l'ensemble de la chaîne cinématique de la turbine (Figure 2.12), est obtenu en regroupant tous les composants respectives développées précédemment (Figures (2.9), (2.10) et (2.11)). Cette figure nous montre que la turbine produit un couple aérodynamique $C_{\text{aéro}}$ à partir de la puissance cinétique P_v du vent et par action de l'angle d'orientation des pâles β . Le multiplicateur de vitesse transforme le couple aérodynamique $C_{\text{aéro}}$ de la turbine en couple du multiplicateur C_g , et en même temps, il transforme la vitesse mécanique Ω en vitesse de la turbine Ω_t la vitesse mécanique de l'arbre de la génératrice Ω résulte de l'application du couple moteur disponible à la sortie du multiplicateur C_g auquel s'oppose le couple électromagnétique C_{em} . Le contrôle de cette dernière peut donc être effectué soit par action sur l'angle d'orientation des pâles soit à travers le couple électromagnétique de la génératrice.

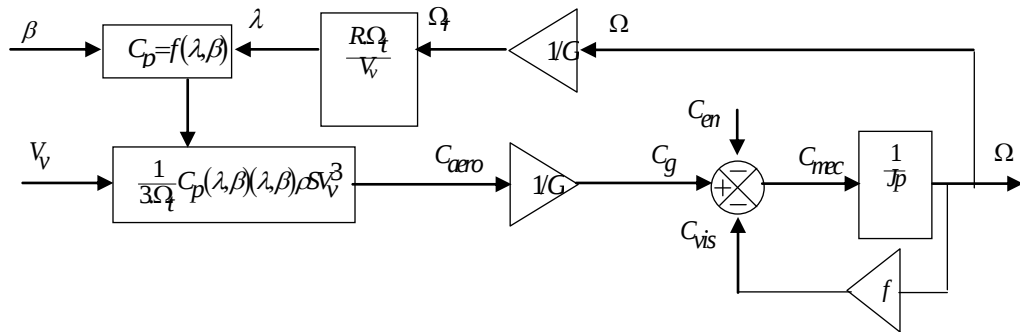


Figure 2.12 : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.

2.2.2.5 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale P_n à partir d'une vitesse de vent nominale V_n (figure 2.13). Pour des vitesses de vents supérieures à V_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnant : V_D la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et $V_{\max}$ la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement [31].

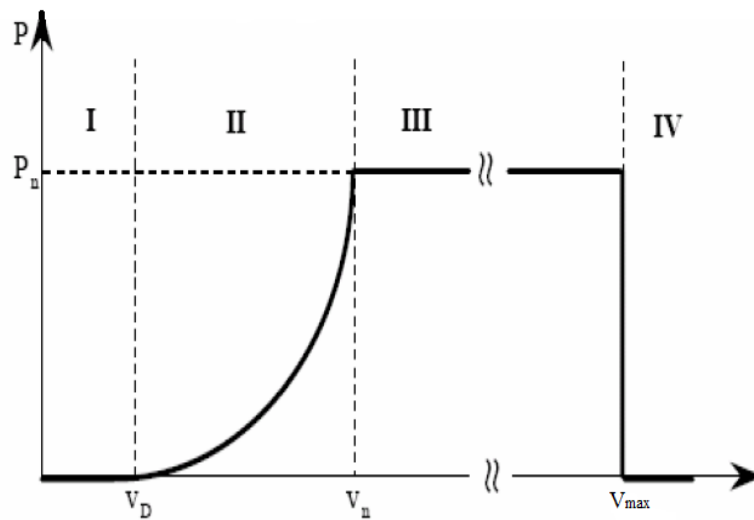


Figure 2.13 : Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne.

Les vitesses V_D , V_n et $V_{\max}$ définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

- La zone I, où $P=0$ (la turbine ne fonctionne pas),
- La zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V ,
- La zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n ,
- La zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

Il existe deux techniques principales pour cette régulation de puissance : le calage variable (les pâles peuvent pivoter autour de leur axe longitudinal afin de réduire la portance et donc le couple moteur) et le décrochage aérodynamique (la conception des pâles induit ce

phénomène qui limite l'action du vent quand la vitesse de celui-ci dépasse sa valeur nominale) [31].

2.2.2.6 Technique d'extraction du maximum de la puissance

Une façon de procéder à la recherche du point maximal de puissance en connaissant la courbe caractéristique de la voilure éolienne à piloter permet de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples et sans utilisation de capteur de la vitesse de vent. Cette façon de procéder exige du constructeur de la voilure des essais de caractérisation extérieur (soufflerie) ou des calculs numériques utilisant la théorie de l'élément de pale [42-39].

Les caractéristiques (Figure 2. 14) pour plusieurs vitesses de vent et pour nous montrent qu'il existe pour chaque courbe un point de puissance optimale correspondant à une certaine vitesse de rotation.

Considérons maintenant le comportement d'une MPPT pour une chaîne de conversion d'énergie éolienne. La commande MPPT permet de se placer au point de puissance optimale, quelle que soit la vitesse de vent, en imposant une vitesse de rotation optimale au moteur. Nous utilisons pour cela la formule suivante :

$$P_{tu} = \frac{1}{2} \rho S \frac{R^3}{\lambda^3} C_P \Omega_{tu}^3 \quad (2.20)$$

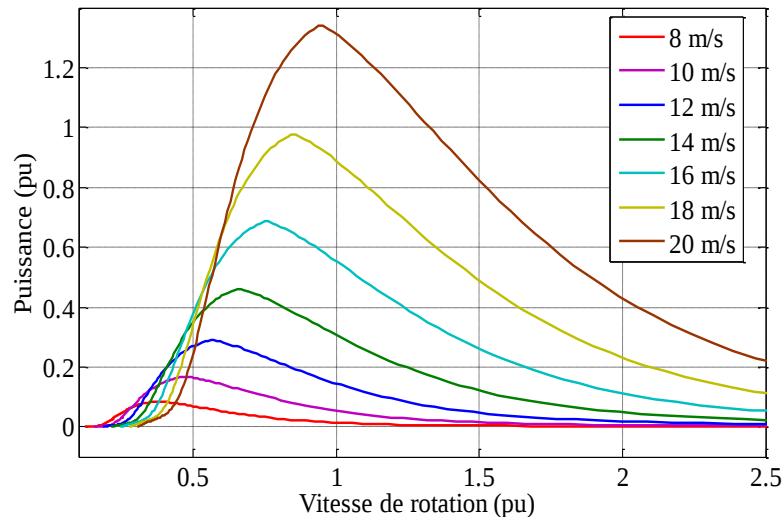


Figure 2.14 : Caractéristiques $P_{tu}(\Omega_{tu})$ à différentes vitesses de vent.

La convergence de la recherche de point maximal de puissance est illustrée selon la figure (2. 8). En pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser pour deux raisons:

- ◆ L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui perturbe la lecture de la vitesse du vent.
- ◆ Le diamètre de la surface balayée par les pâles étant important, une variation sensible du vent apparaît selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales.

Une mesure erronée de la vitesse du vent conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique MPPT utilisant un capteur de la vitesse du vent. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse.

Cette technique repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine :

$$J \frac{d\Omega_{gn}}{dt} = 0 = C_{gn} - C_e - C_f \quad (2.21)$$

En négligeant l'effet du couple des frottements ($C_f \approx 0$), on obtient

$$C_{gn} = C_e \quad (2.22)$$

Donc on peut mesurer la puissance P_{ur} pour chaque pas de calcul présenté sur la figure (2.18).

$$P_{tu} = C_e \Omega_{gn} \quad (2.23)$$

Le fonctionnement de la MPPT peut être expliqué par la figure (2.15). Supposons pour cela que la vitesse du vent est de $11m/s$. La MPPT calcule alors la vitesse Ω_{u2} à imposer à la génératrice correspondant à P_{tu1} . Le système se place alors au point (Ω_{u2}, P_{tu1}) .

Une fois la vitesse de référence envoyée, le système va évoluer en P_{tu2} et se retrouver au point (Ω_{u2}, P_{tu2}) . La MPPT calcule à nouveau la vitesse Ω_{u3} correspondant à P_{tu2} et le système se place alors au point (Ω_{u3}, P_{tu2}) . Le système évolue donc vers le point de puissance optimale quelle que soit la vitesse de vent.

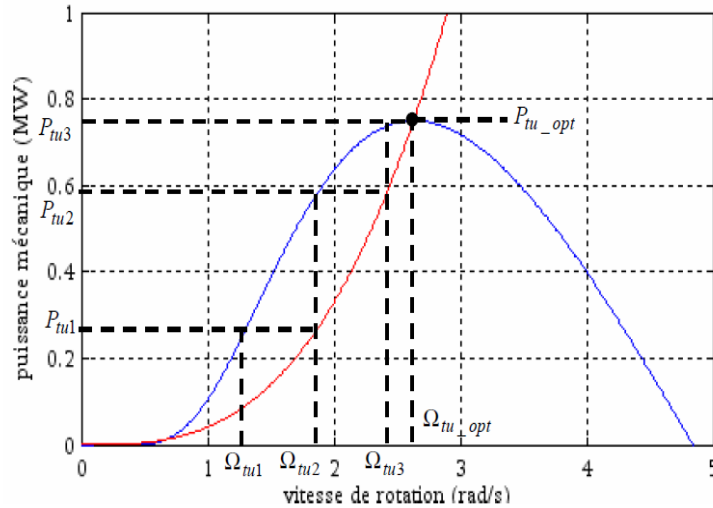


Figure 2. 15 : Convergence vers le point optimal.

2.3 Partie électrique.

Les génératrices asynchrones ont la réputation d'être des machines robustes et peu chères. Ce qui explique pourquoi elles sont les plus utilisées actuellement, quelle que soit la taille de l'éolienne, Mais leurs inconvénients majeurs restent la puissance extraite non optimisée, maintenance de la boîte de vitesse, pas de contrôle de l'énergie réactive et la magnétisation de la machine est imposée par le réseau [43].

2.3.1 Présentation de la machine.

Une génératrice asynchrone à cage est constituée de 2 parties : le stator et le rotor. Le stator, représente la partie statique de la génératrice. Il est constitué d'un circuit magnétique comportant de multiples encoches à l'intérieur desquelles sont placées 3 bobinages formant l'enroulement triphasé du stator. Le rotor, partie mobile, est formé d'un circuit magnétique où est logé des barres généralement en cuivre ou en aluminium coulé. Ces barres sont reliées entre elles à chaque extrémité par un anneau de court-circuit [44]. Les barreaux visibles sur la figure (2.16) sont les branches des boucles qui se déplacent à l'intérieur du champ magnétique tournant du stator.

Les barreaux de la cage de la génératrice asynchrone ne sont pas lisibles, ils sont couverts d'un matériau magnétique qui favorise la formation de pôles magnétiques sur la surface du rotor [14].

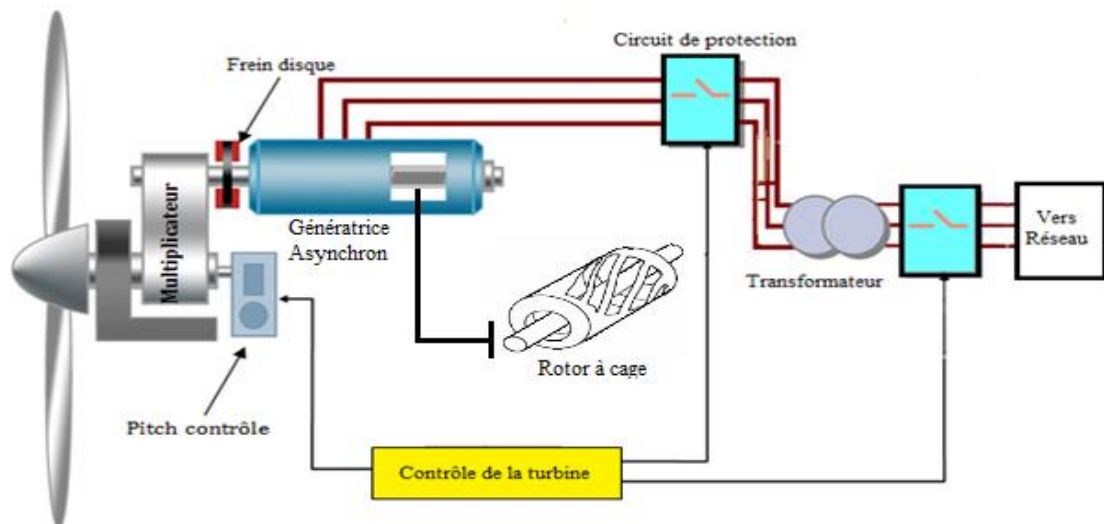


Figure 2.16 : *Génératrice Asynchrone dans le contexte éolien.*

2.3.2 Hypothèse de travail

La modélisation mathématique d'un système complexe, telle la machine, est éventuellement bâtie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices soigneusement formulées. Plus le nombre de ces hypothèses est grand, plus simple et moins précis sera le modèle.

- Entrefer constant.
- Effet des encoches négligé.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Pertes ferromagnétiques négligeables.
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

Parmi les conséquences importantes ces hypothèses, on peut citer :

- L'additivité des flux
- La constance des inductances propres
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

2.3.3 Représentation de la machine dans le Repère (ABC) .

Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques, assumées comme un bobinage équivalent pour la cage du rotor, dans l'espace peuvent être représentés comme indiqué sur la figure (2.17). Les phases rotoriques sont court-circuitées sur elles-

mêmes. θ , étant la position absolue du rotor prise entre les axes des phases A du stator et rotor, respectivement

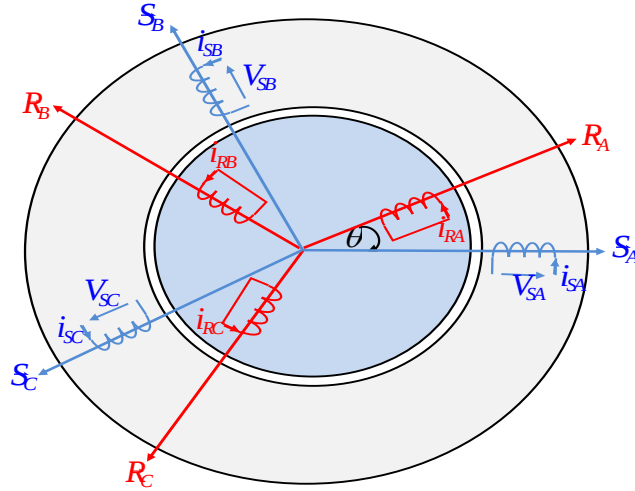


Figure 2.17 : Représentation des enroulements de la génératrice dans l'espace électrique.

2.3.4 Equations électriques réelles de la machine

Par application de la loi de Faraday on a :

$$V = Ri + \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.24)$$

En tenant compte des hypothèses simplificatrices citées précédemment, on peut exprimer le modèle de cette génératrice par les relations suivantes :

▪ Au stator :

$$\begin{cases} V_{SA} = R_S i_{SA} + \frac{d\phi_{SA}}{dt} \\ V_{SB} = R_S i_{SB} + \frac{d\phi_{SB}}{dt} \\ V_{SC} = R_S i_{SC} + \frac{d\phi_{SC}}{dt} \end{cases} \quad (2.25)$$

▪ Au rotor :

$$\begin{cases} V_{RA} = 0 = R_R i_{RA} + \frac{d\phi_{RA}}{dt} \\ V_{RB} = 0 = R_R i_{RB} + \frac{d\phi_{RB}}{dt} \\ V_{RC} = 0 = R_R i_{RC} + \frac{d\phi_{RC}}{dt} \end{cases} \quad (2.26)$$

- Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{SA} \\ V_{SB} \\ V_{SC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{SA} \\ i_{SB} \\ i_{SC} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{SA} \\ \phi_{SB} \\ \phi_{SC} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\begin{bmatrix} V_{RA} \\ V_{RB} \\ V_{RC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{RA} \\ i_{RB} \\ i_{RC} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{RA} \\ \phi_{RB} \\ \phi_{RC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

- D'où les formes matricielles condensées seront :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] = [0] \end{cases} \quad (2.29)$$

Avec :

$$\begin{cases} [R_s] = R_s [ID]_{33} \\ [R_r] = R_r [ID]_{33} \end{cases} \quad (2.30)$$

Où :

$[ID]_{33}$: La matrice identité d'ordre 3

2.3.5 Équations magnétiques

Les flux statoriques et rotoriques en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles, sont exprimés par les équations suivantes :

- Au stator :

$$[\Phi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (2.31)$$

- Au rotor :

$$[\Phi_r] = [M_{rs}][I_s] + [L_r][I_r] \quad (2.32)$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix}, [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^{-1} = m_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Où :

R_s, R_r : Résistances statorique et rotorique.

L_s, L_r : Inductances propres statorique et rotorique.

M_{sr}, M_{rs} : Inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

M_{ss}, M_{rr} : Inductances mutuelles statorique-statorique et rotorique-rotorique.

l_s, l_r : Respectivement les inductances propres d'une phase statorique et d'une phase rotorique.

m_s : Le coefficient d'inductance mutuelle entre deux phases statoriques

m_r : Le coefficient d'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.

$m_{sr} = m_{rs}$: Valeur maximale des coefficients d'inductances mutuelles entre phases rotorique et statorique.

En remplaçant les équations du flux magnétique (2.31) et (2.32) dans (2.29) on obtient les expressions matricielles suivantes :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + [L_s] \cdot \frac{d}{dt}[I_s] + \frac{d}{dt}([M_{sr}] \cdot [I_r]) \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + [L_r] \cdot \frac{d}{dt}[I_r] + \frac{d}{dt}([M_{rs}] \cdot [I_s]) = [0] \end{cases} \quad (2.35)$$

2.3.6 Le couple électromagnétique

L'équation du couple électromagnétique est donnée par l'expression suivante :

$$C_{em} = \frac{1}{2} \cdot [I]^T \cdot \left\{ \frac{d}{dt}[L] \right\} \cdot [I] \quad (2.36)$$

Avec :

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Et :

$$[I] = [I_{as} \quad I_{bs} \quad I_{cs} \quad I_{ar} \quad I_{br} \quad I_{cr}] \quad (2.38)$$

Les matrices $[L_s]$ et $[L_r]$ ne contiennent que des termes constant lorsque l'angle θ varient, cela permet de simplifier l'expression du couple :

$$C_{em} = \frac{1}{2} \cdot [I_s]^T \cdot \left\{ \frac{d}{d\theta}[M_{sr}] \right\} \cdot [I_r] \quad (2.39)$$

On peut également exprimer le couple électromagnétique en fonction du couple résistant opposé, du moment d'inertie de toutes les parties tournantes et du coefficient de frottement visqueux.

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega = C_{em} - C_r \quad (2.40)$$

Avec :

J : Moment d'inertie de la partie tournante.

Ω : Vitesse angulaire de rotation.

f : Coefficient de frottement visqueux.

C_r : Couple résistant.

2.3.7 Modèle de la génératrice asynchrone dans le plan (d,q) .

2.3.7.1 Transformation de Park.

La transformation de Park est ancienne (1929) et découle de la diagonalisation des matrices inductances statoriques et rotoriques. Cette transformation est constituée d'une transformation linéaire triphasé-diphasé, i.e. le passage biunivoque $(ABC-\alpha\beta)$, suivie d'une rotation. Il existe principalement deux transformations $(ABC-\alpha\beta)$: Clarke ou Concordia. Celle dite de Clarke conserve l'amplitude des vecteurs mais pas la puissance ni le couple qui devraient être multipliés par le coefficient $3/2$. Tandis que celle de Concordia, qui est normée, conserve la puissance mais pas les amplitudes des vecteurs [4]. Le repère $\alpha\beta$ est rigidement fixe au repère abc (figure 2.18), par contre le repère (d,q) est libre. Ce dernier est repéré par rapport $(\alpha\beta)$ par un angle θ_s , appelé l'angle de Park ou angle d'observation du référentiel unique de Park [31].

On désigne par : "d" l'axe direct et par "q" l'axe en quadrature arrière. La rotation dans le sens horaire est introduite par la matrice suivante :

$$[X_{dp}] = [P(\Psi)] \cdot [X_{ABC}] \quad (2.41)$$

$$[X_{ABC}] = [P(\Psi)]^{-1} \cdot [X_{dp}] \quad (2.42)$$

Avec :

$$[P(\Psi)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & \cos(\Psi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\Psi - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\Psi) & -\sin(\Psi - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Psi - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

2.3.7.2 Transformation inverse de Park

La matrice de changement de base $[P(\Psi)]$ étant orthonormée, le calcul de sa matrice inverse est très simple :

$$[p(\psi)]^{-1} = [P(\psi)]^T \quad (2.44)$$

$$[p(\psi)]^{-1} = [P(\psi)]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

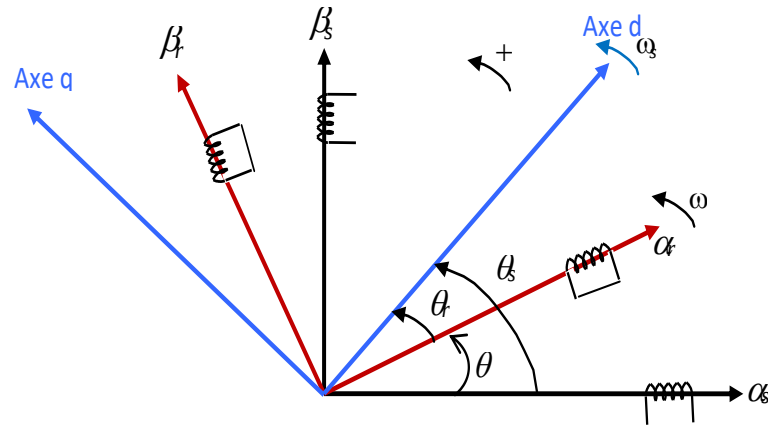


Figure 2.18 : Repères de référence: Statorique α_s, β_s rotorique α_r, β_r et tournant d-q.

Avec :

$$\Psi = \theta_s \text{ Pour les grandeurs statoriques}$$

Et

$$\Psi = \theta_r \text{ Pour les grandeurs rotoriques.}$$

2.3.7.3 Modèle de base de Park

Après la transformation de Park on obtient les équations suivantes :

- **Equations électriques**

En grandeurs de phase, on a :

$$[V_{ABC}]_s = R_s [I_{ABC}] + \frac{d}{dt} [\phi_{ABC}] \quad (2.46)$$

En multipliant les deux membres par $[P(\Psi)]$, on obtient :

$$[P(\Psi)][V_{ABC}]_s = R_s [P(\Psi)][I_{ABC}] + [P(\Psi)] \cdot \frac{d}{dt} [\phi_{ABC}] \quad (2.47)$$

Et de la :

$$\begin{cases} V_{\phi s} = R_s i_{\phi s} + \frac{d}{dt} \phi_{\phi s} - \omega_s \phi_{\phi r} \\ V_{\phi r} = R_s i_{\phi r} + \frac{d}{dt} \phi_{\phi r} + \omega_s \phi_{\phi s} \\ V_{\phi t} = R_s i_{\phi t} + \frac{d}{dt} \phi_{\phi t} - \omega_r \phi_{\phi q} \\ V_{\phi q} = R_s i_{\phi q} + \frac{d}{dt} \phi_{\phi q} + \omega_r \phi_{\phi t} \end{cases} \quad (2.48)$$

Ou :

$$\begin{cases} \frac{d\phi_{\phi s}}{dt} = V_{\phi s} - R_s i_{\phi s} + \omega_s \phi_{\phi r} \\ \frac{d\phi_{\phi r}}{dt} = V_{\phi r} - R_s i_{\phi r} - \omega_s \phi_{\phi s} \\ \frac{d\phi_{\phi t}}{dt} = V_{\phi t} - R_s i_{\phi t} + \omega_r \phi_{\phi q} \\ \frac{d\phi_{\phi q}}{dt} = V_{\phi q} - R_s i_{\phi q} - \omega_r \phi_{\phi t} \end{cases} \quad (2.49)$$

- **Equations magnétiques**

On rappelle les expressions des flux statoriques et rotoriques dans le référentiel triphasé donnée par les relations (2.50) :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s \\ L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{sr} \\ M_{rs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_r \\ I_s \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2.50)$$

On appliquant la transformation de Park et on multipliant les deux membres par $[P(\Psi)]$, on obtient :

$$\begin{cases} [P(\Psi)] \begin{bmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{bmatrix} = [P(\Psi)] \begin{bmatrix} L_s \\ L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} + [P(\Psi)] \begin{bmatrix} M_{sr} \\ M_{rs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_r \\ I_s \end{bmatrix} \\ [P(\Psi)] \begin{bmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{bmatrix} = [P(\Psi)] \begin{bmatrix} L_s \\ L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} + [P(\Psi)] \begin{bmatrix} M_{sr} \\ M_{rs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_r \\ I_s \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2.51)$$

Avec :

$$\begin{cases} M_{sr} = M_{rs} = M \\ \begin{bmatrix} L_s \\ L_r \end{bmatrix} = \sigma e \\ \begin{bmatrix} L_s \\ L_r \end{bmatrix} = \sigma e \end{cases} \quad (2.52)$$

M : La matrice d'inductance mutuelle entre le stator et le rotor.

Et :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_{AA} & l_{AB} & l_{AB} \\ l_{AB} & l_{AA} & l_{AB} \\ l_{AB} & l_{AB} & l_{AA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{AA} - l_{BB} & 0 & 0 \\ 0 & l_{AA} - l_{BB} & 0 \\ 0 & 0 & l_{AA} - l_{BB} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{AA} & l_{AB} & l_{AB} \\ l_{AB} & l_{AA} & l_{AB} \\ l_{AB} & l_{AB} & l_{AA} \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

Finalement les relations entre flux et courants s'exprime donc par :

$$\begin{aligned} \phi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \phi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \phi_{dr} &= L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \phi_{qr} &= L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{aligned} \quad (2.54)$$

Ou :

$$\begin{aligned} i_{ds} &= \frac{1}{\sigma L_s} \phi_{ds} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \phi_{dr} \\ i_{qs} &= \frac{1}{\sigma L_s} \phi_{qs} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \phi_{qr} \\ i_{dr} &= \frac{1}{\sigma L_r} \phi_{dr} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \phi_{ds} \\ i_{qr} &= \frac{1}{\sigma L_r} \phi_{qr} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \phi_{qs} \end{aligned} \quad (2.55)$$

σ : Le facteur de dispersion

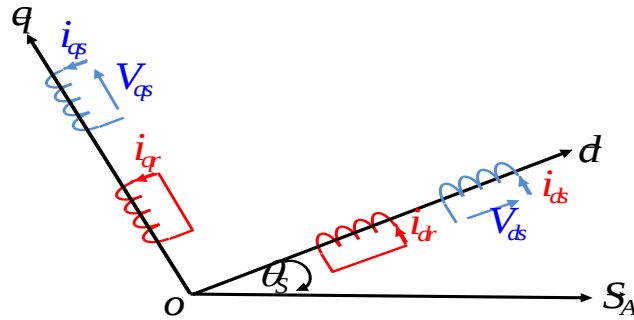


Figure 2.19 : Représentation de la machine dans le repère de Park.

On pose :

$$[V] = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix}, [I] = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}, [\phi] = \begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \\ \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \end{bmatrix}, [\omega] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s & 0 & 0 \\ \omega_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_r \\ 0 & 0 & \omega_r & 0 \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}, [L] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

Donc, on peut écrire :

$$[V] = [R] \cdot [I] + \frac{d}{dt} [\phi] \cdot [\omega] \cdot [\phi] \quad (2.58)$$

Avec

$$[\phi] = [L] \cdot [I] \quad (2.59)$$

- **Equation mécanique**

Pour compléter le Modèle nous pouvons ajouter la relation fondamentale de la dynamique pour les corps en rotation :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_{em} - C_r \quad (2.60)$$

Avec :

$$\Omega = \frac{\omega}{\pi} \quad (2.61)$$

Alors le couple électromagnétique développé par la machine est exprimer par :

$$C_{em} = p(\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad (2.62)$$

- **Puissances active et réactive**

Les puissances actives et réactives générées par la génératrice dépendent aussi des variables électriques du stator. La puissance apparente est donnée par l'équation suivante :

$$S_s = V_s \dot{I}_s \quad (2.63)$$

Alors les expressions des puissances active et réactive aux niveaux du stator, sont exprimés par :

$$\begin{cases} P_s = \text{Re}(S_s) \\ Q_s = \text{Im}(S_s) \end{cases} \quad (2.64)$$

2.3.8 Modèle d'état de la génératrice asynchrone.

Si l'on prend comme variable d'état $(\phi_{ds} \phi_{qs} i_{dr} i_{qr} \omega)$ dans le repère (d, q) lié au champ tournant à la vitesse de synchronisme ω_s , le système d'équations différentielles de la GAS dans le repère de Park, s'écrit comme suite :

$$\begin{cases}
\frac{d\phi_{ds}}{dt} = V_{ds} + M \frac{R_s}{L_s} i_{dr} - \frac{R_s}{L_s} \phi_{ds} + \omega_s \phi_{qs} \\
\frac{d\phi_{qs}}{dt} = V_{qs} + M \frac{R_s}{L_s} i_{qr} - \frac{R_s}{L_s} \phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \\
\sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} = \frac{MR_s}{L_s L_s} \phi_{ds} - \frac{M}{L_s} \omega \phi_{qs} - \left(R_r + \frac{MM}{L_s L_s} R_s \right) i_{dr} + \sigma L_r \omega i_{qr} + \left(V_{dr} - \frac{M}{L_s} V_{ds} \right) \\
\sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} = \frac{M}{L_s} \omega \phi_{ds} + \frac{MR_s}{L_s L_s} \omega \phi_{qs} - \left(R_r + \frac{MM}{L_s L_s} R_s \right) i_{qr} - \sigma L_r \omega i_{dr} + \left(V_{qr} - \frac{M}{L_s} V_{qs} \right) \\
\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (C_{em} - C_r) - \frac{F}{J} \omega
\end{cases} \quad (2.65)$$

Où :

$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s}$: Est le facteur de dispersion ; appeler aussi *coefficient de blondel*.

- **Relation entre flux et courants**

$$\begin{aligned}
i_{sd} &= \frac{1}{L_s} (\phi_{sd} - L_m i_{rd}) \\
i_{sq} &= \frac{1}{L_s} (\phi_{sq} - L_m i_{rq}) \\
\phi_{rd} &= \frac{L_m}{L_s} \phi_{sd} + \sigma L_r i_{rd} \\
\phi_{rq} &= \frac{L_m}{L_s} \phi_{sq} + \sigma L_r i_{rq}
\end{aligned} \quad (2.66)$$

- **Couple électromagnétique**

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (\phi_{qs} i_{dr} - \phi_{ds} i_{qr}) \quad (2.67)$$

2.4 Simulation de la chaîne éolienne basée sur une génératrice asynchrone

La simulation numérique est devenue à l'heure actuelle le moyen privilégié d'étude préalable, en ce qui concerne les systèmes complexes. Il s'agit d'un outil puissant pour vérifier la validité de la conception durant ces premières étapes. Plusieurs logiciels sont utilisés pour la simulation, nous utilisons le logiciel (Matlab /Simulink) pour cela.

Le modèle de simulation de la GAS sous MATLAB Simulink basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park liée au champ tournant est présenté par la figure (2.20).

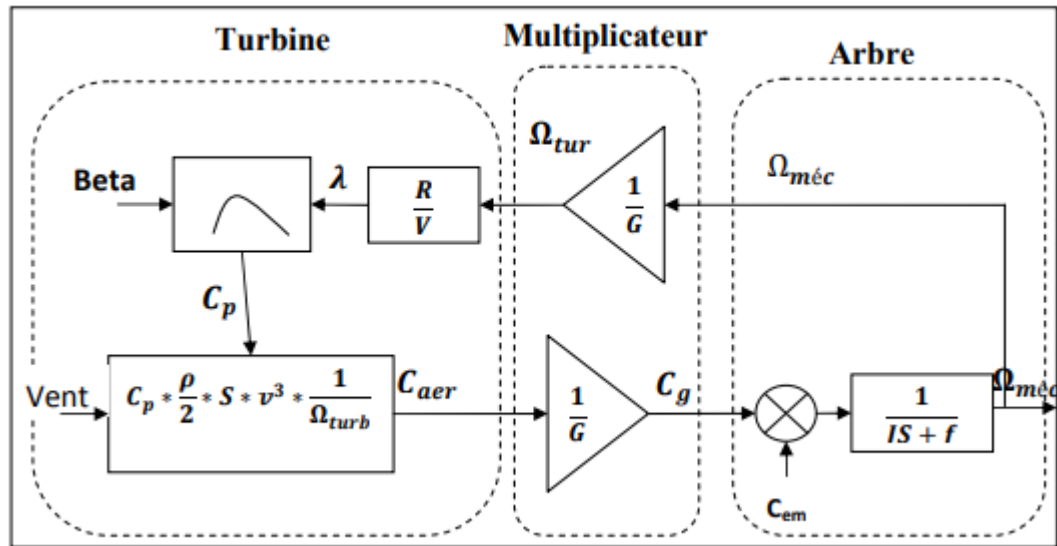


Figure 2.20 : Système de conversion de la chaîne éolienne basé sur une GAS.

2.4.1 Évolution de la vitesse de rotation et du couple électromagnétique

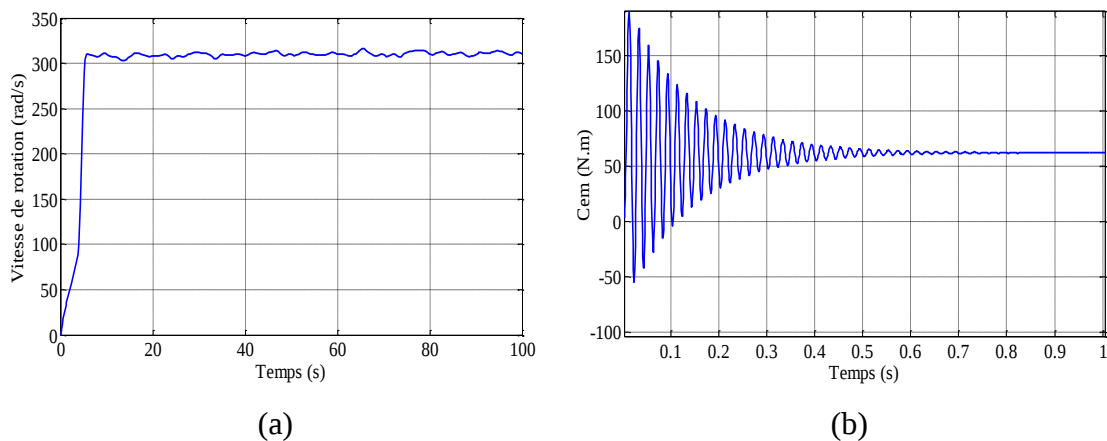


Figure 2.21 : (a) Vitesse de rotation de la GAS

(b) Couple électromagnétique de la GAS.

Les résultats inhérents à cette simulation sont représentés par la figure (2.21), on remarque que la vitesse de rotation de la GAS passe par zéro et commence à augmenter jusqu'à atteindre la valeur de 300 rad/s au bout de 6s, et reste constante aux alentours de cette valeur mais avec des vibrations figure (2.21.a). On remarque sur la figure (2.21.b) que le couple électromagnétique, pendant la phase de démarrage, prend des oscillations qui atteignent une valeur voisine de (180 N.m) d'amplitude, puis se stabilise à sa valeur nominale qui est de 60 N.m.

2.4.2 .Évolution des courants et flux statoriques

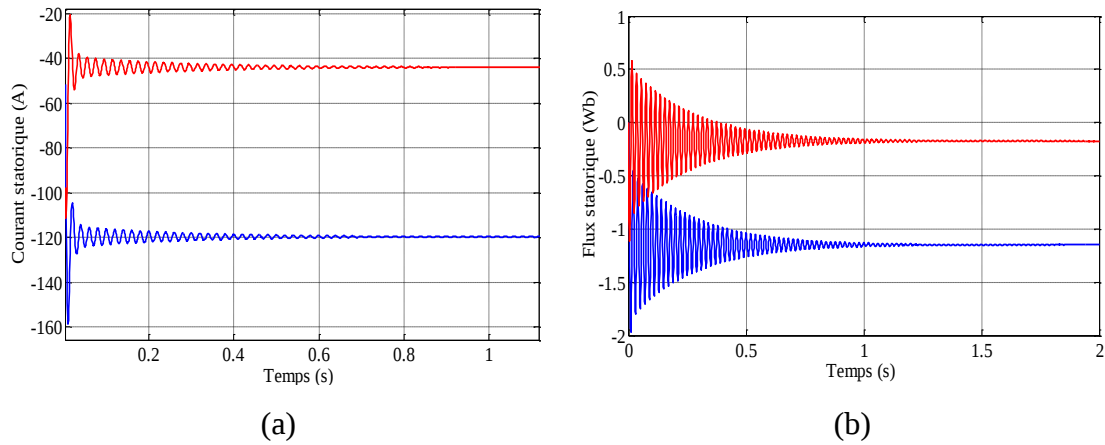


Figure 2.22 : (a) Courants statoriques i_{ds} et i_{qs}
(b) Flux statoriques

Pendant la phase de démarrage, les courants statoriques sont fortement oscillatoires ; leurs amplitudes atteignent des valeurs de 10A figure (2.22.a). Les flux statoriques représentés par la figure (2.22.b), ont presque la même forme, on remarque que pendant la phase de démarrage ces flux prennent des modulations (oscillations), puis à $t=0.5$ s, prenant des valeurs entre (-2 et 0.5(Wb)) et restent stable.

2.4.3 .Évolution des courants et flux rotoriques

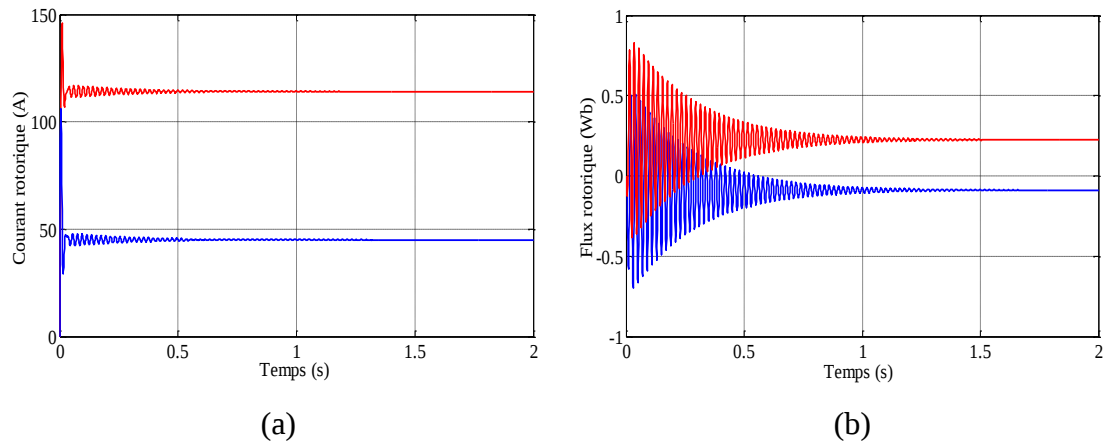


Figure 2.23 : (a) Courants rotoriques i_{dr} et i_{qr}
(b) Flux rotoriques

Les courants rotoriques ont presque les mêmes formes que les courants statoriques, d'amplitude égale à 10A figure (2.23.a). Les flux rotoriques prennent des modulations

(oscillations), puis à $t=0.4$ s, prenant des valeurs entre $(-0.8$ et $0.8)$ (Wb) et restent stable figure (2.23.b).

2.4.4 Évolution des Puissances statoriques.

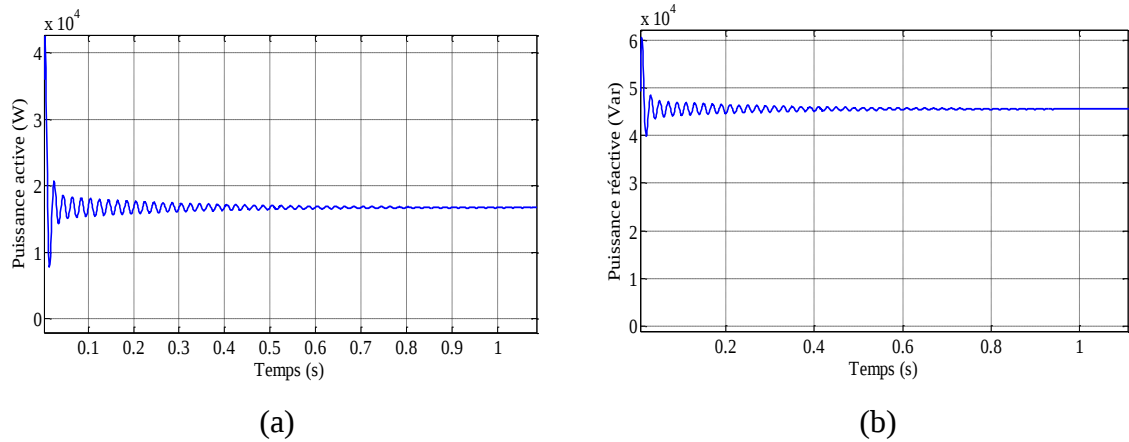


Figure 2.24 : (a) Puissances active statoriques
(b) Puissances réactive statoriques

Les courbes de la figure (2.24) représentant l'évolution des puissances statoriques active et réactive (P_S et Q_S), elles montrent que ces puissances atteignent respectivement durant le régime permanent $1.8W$ et $4.5VA$.

2.5 Modélisation d'un générateur photovoltaïque

2.5.1 Modèle mathématique d'une cellule solaire

La figure (2.25), représente le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode, celle-ci est composée d'une diode [14], une source de courant, une résistance en série et une résistance en parallèle [47-46]. Le courant d'obscurité de la diode (I_L) est une fonction de l'irradiation solaire incidente et de la température de la cellule.

La jonction p-n de la cellule PV est représentée par la diode. La résistance série (R_S) est la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. De plus, une résistance shunt (R_p) qui est due à un courant de fuite au niveau de la jonction.

Ce modèle n'est pas universel, de nombreux auteurs [48], ont proposés des modèles plus sophistiqués qui présentent avec plus de précision le phénomène photovoltaïque. On recense ainsi deux autres modèles:

- Le modèle à deux diodes: cette diode supplémentaire permettant de reproduire dans le schéma équivalent les effets chimiques de recombinaison des électrons.
- Le modèle à trois diodes: la troisième diode incluant dans le schéma équivalent les effets non pris en compte dans les autres modèles (ex: courant de fuite liés aux diodes).

Le modèle à une diode offre un bon compromis entre simplicité et précision. Les équations mathématiques développées pour la modélisation de la cellule photovoltaïque sont basées sur la caractéristique courant - tension. Le courant généré par la cellule photovoltaïque est donné par la première loi de Kirchhoff :

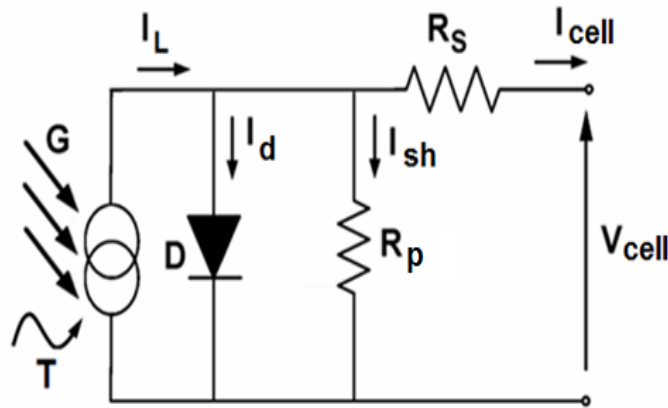


Figure 2.25 : Circuit équivalent d'une cellule solaire

$$I_{cell} = I_L - I_d - I_{sh} \quad (2.68)$$

Où:

$$I_d = I_0 (e^{V_d/nV_t} - 1) \quad (2.69)$$

$$I_{sh} = V_d / R_p \quad (2.70)$$

$$V_d = V_{cell} + R_s I_{cell} \quad (2.71)$$

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (2.72)$$

I_{cell} et V_{cell} sont le courant de sortie et la tension de sortie de la cellule PV respectivement, V_t est la tension thermique, I_0 est le courant de saturation de polarisation inverse de la diode, q est la charge élémentaire (1.6×10^{-19} C), k est la constante de Boltzman (1.38×10^{-23} J/°K), T est la température de la cellule (°K), et n est le facteur d'idéalité de la diode.

Ainsi les caractéristiques I - V de la cellule PV sont données par :

$$I_{cell} = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{nV}} - 1 \right) - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \quad (2.73)$$

2.5.2 Modèle mathématique d'un panneau solaire de Ns cellules en série

Le panneau solaire photovoltaïque est par définition un ensemble de cellules photovoltaïques assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. En effet, une cellule photovoltaïque élémentaire ne génère pas suffisamment de tension : entre 0.5 et 1.5V selon les technologies. Il faut presque toujours plusieurs cellules en série pour avoir une tension utilisable [49].

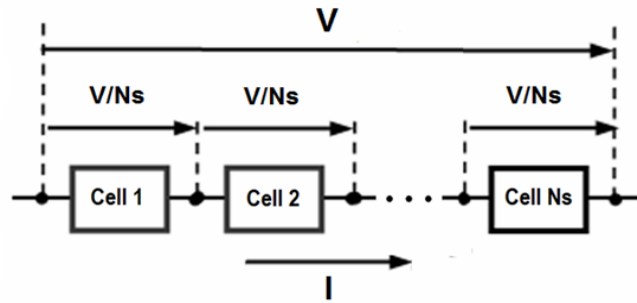


Figure 2.26 : Groupement de Ns cellules en série

Un panneau photovoltaïque est composé de Ns cellules solaires en série, il a le même courant de sortie et l'équation de la tension de sortie est donnée par :

$$V = N_s V_{cel} \quad (2.74)$$

L'équation de la caractéristique I - V est alors :

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V + N_s R_s I}{nV}} - 1 \right) - \frac{V + N_s R_s I}{N_s R_p} \quad (2.75)$$

A partir de l'équation 2.75, pour $V=0$, l'expression du courant de court-circuit I_{sc} du panneau photovoltaïque est ainsi obtenue :

$$I_{sc} = I_L - I_0 \left(e^{\frac{R_s I_{sc}}{nV}} - 1 \right) - \frac{R_s I_{sc}}{R_p} \quad (2.76)$$

Pour une cellule solaire idéale ($R_s \rightarrow 0$, $R_p \rightarrow \infty$) nous pouvons écrire :

$$I_L = I_{sc} \quad (2.77)$$

Alors l'équation (2.75) devient:

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V + N_s R_s I}{n N_s}} - 1 \right) - \frac{V + N_s R_s I}{N_s R_p} \quad (2.78)$$

La valeur instantanée du courant de court-circuit peut être trouvée en utilisant l'équation suivante [46]:

$$I_{sc} = (I_{scstc} + \alpha(T - T_{stc})) \cdot \frac{G}{G_{stc}} \quad (2.79)$$

Où I_{scstc} est le courant de court-circuit dans les conditions standard du module photovoltaïque qui est fourni par le fabricant de ce module photovoltaïque, G et G_{stc} sont respectivement l'instantané et la condition standard d'irradiance solaire du module photovoltaïque, T et T_{stc} sont respectivement les températures instantanée et la condition standard du module photovoltaïque et α le coefficient de température du court-circuit d'une cellule photovoltaïque. Puisque $G_{stc} = 1000 \text{ W/m}^2$ et l'effet de la variation de la température sur la valeur de I_{sc} est négligeable (moins de 1%), nous pouvons écrire :

$$I_{sc} = \frac{G}{1000} I_{scstc} \quad (2.80)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{N_s R_p}}{e^{\frac{V_{oc}}{n N_s}} - 1} \quad (2.81)$$

Où V_{oc} est la tension de circuit ouvert du module photovoltaïque.

2.5.3 Modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque

Lorsque les panneaux photovoltaïques sont groupés en série-parallèle en formant ainsi un générateur photovoltaïque. La tension V_A fournie par ce générateur, le courant I_A et la puissance P_A sous irradiation uniforme peuvent être obtenus à partir de la tension V et le courant I du module photovoltaïque comme suit :

$$\begin{cases} V_A = N_{ss} \times V \\ I_A = N_{pp} \times I \\ P_A = V_A \times I_A = N_{ss} \times N_{pp} \times V \times I \end{cases} \quad (2.82)$$

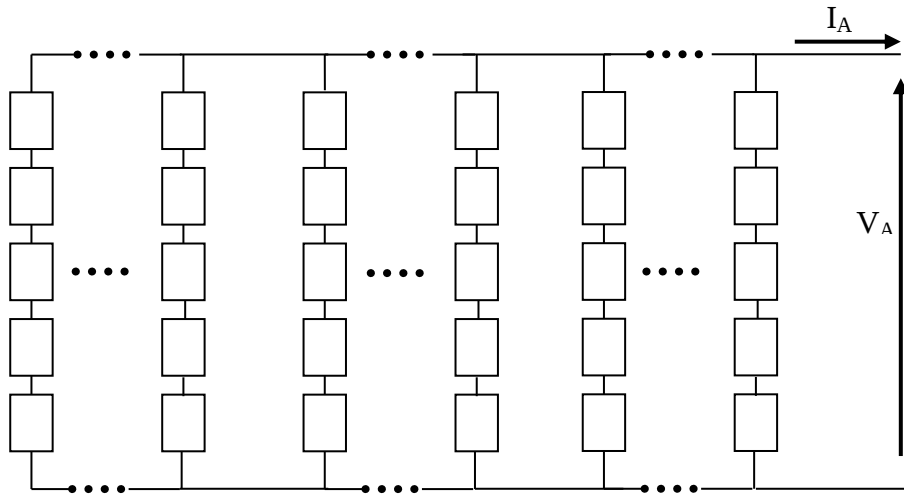


Figure 2.27 : Matrice solaire formée de plusieurs groupes de colonne solaire formant un générateur photovoltaïque

Où N_{ss} et N_{pp} sont respectivement le nombre de panneaux PV en série et parallèle du générateur photovoltaïque. Un programme sous Matlab a été écrit dans le but de résoudre les équations (2.78) et (2.82) dans l'ordre et puis tracer les courbes I - V et P - V du générateur photovoltaïque sous radiation uniforme. Le facteur d'idéalité n de la diode a été pris comme unité.

La solution de l'équation (2.78) est obtenue pour une grille de valeurs du courant I , en utilisant la méthode de bisection pour résoudre l'équation non linéaire $f(V)=0$ dans l'intervalle $[0 V_{oc}]$ où $f(V)$ est donnée par :

$$f(V) = I - I_{sc} + I_0 \left(e^{\frac{V + N_s R_s I}{n N_s V_s}} - 1 \right) + \frac{V + N_s R_s I}{N_s R_p} \quad (2.83)$$

2.5.4 Association des panneaux photovoltaïques

2.5.4.1. Association en série

L'association des panneaux solaires photovoltaïques en série permet d'atteindre une tension désirée. Le courant de la branche reste le même, mais la tension augmente proportionnellement selon le nombre de cellules mises en série. La figure (2.28). illustre la simulation de la caractéristique I - V d'un générateur PV composé de six panneaux photovoltaïques en série ($N_{ss}=6$), du type Suntech STP080 12/B6 monocristallin, dans des

conditions d'ensoleillement standard (1000W/m^2 , 25°C), dont les caractéristiques électriques sont données dans le tableau 2.1:

Tension à circuit ouvert	Voc (V)	21.9
Tension optimale	Vm (V)	17.5
Courant de court-circuit	Isc (A)	4.95
Courant optimal	Im (A)	4.57
Puissance maximale	Pm (W)	80
Coefficient de température de Isc	K_I	0.020 %/K
Coefficient de température de Vco	K_V	-0.34 %/K
Résistance série à Tstc	$R_s (\Omega)$	0.0102
Résistance parallèle à Tstc	$R_p (\Omega)$	4.6278

Tableau 2.1 : Caractéristiques du module PV Suntech STP080 12/B6 monocristallin

L'équation 2.84 résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_s cellules.

$$\sum V_{co} = N_{ss} * V_{co} \quad (2.84)$$

et I_{sc} reste le même.

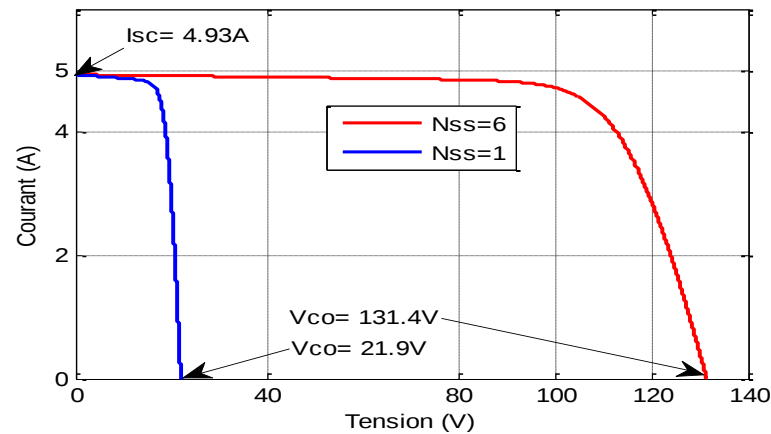


Figure 2.28: Simulation de six panneaux PV en série

La simulation montre que les tensions sont additionnées et le courant est quasiment le même, à savoir $V_{co}=21.9*6=131.4\text{V}$ et $I_{sc}= 4.93 \text{ A}$.

2.5.4.2. Association en parallèle

D'autre part, une association parallèle de modules photovoltaïque permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé et la tension reste la même. La caractéristique

résultant du groupement est obtenue par addition des courants, Figure (2.29), illustre la simulation de la caractéristique $I-V$ d'un générateur photovoltaïque composé de six panneaux en parallèle. L'équation 2.85, résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle ($N_{pp}=6$) :

$$\sum I_{sc} = N_{pp} * I_{sc} \quad (2.85)$$

et la tension V_{oc} reste la même.

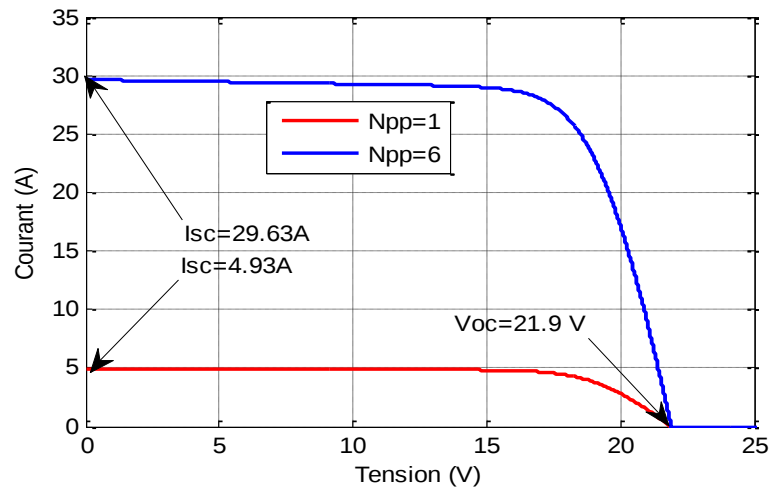


Figure 2.29 : Simulation de six panneaux PV en parallèle

De la même manière, cette simulation illustre bien l'équation 2.85, les courants s'ajoutent et la tension reste la même, d'où $I_{sc}=4.93*6=29.63A$ et $V_{oc}=21.9V$.

2.5.4.3. Association mixte des panneaux solaires photovoltaïques

Afin d'obtenir des puissances désirées par exemple de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en rangées de panneaux série et parallèle pour former un générateur photovoltaïque. La constitution d'un générateur photovoltaïque de puissance élevée se limite par le poids et la manipulation des modules à utiliser. Pour cela, on réunit systématiquement plusieurs modules photovoltaïques et on les câble entre eux avant de les relier au reste du système [50]. Les équations 2.86 et 2.87, résument ce cas de groupement :

$$\sum I_{sc} = N_{pp} * I_{sc} \quad (2.86)$$

Et

$$\sum V_{oc} = N_{ss} * V_{oc} \quad (2.87)$$

La figure (2.30), illustre la simulation d'un groupement mixte de modules photovoltaïques avec ($N_{ss}=3$ et $N_{pp}=2$) :

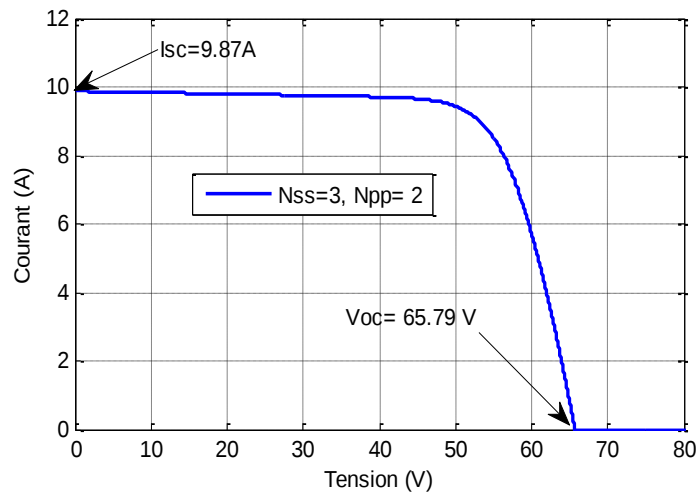


Figure 2.30 : Simulation d'un groupement mixte de panneaux PV, avec $N_{ss}=3$ et $N_{pp}=2$

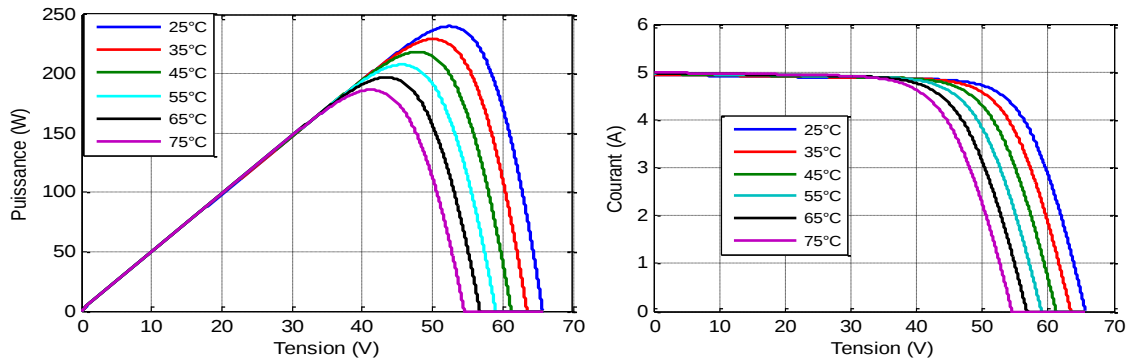
Les équations (2.86 et 2.87) sont bien vérifiées par la simulation, il est montré que :
 $V_{oc}=21.9*3=65.7$ V et $I_{sc}=4.85*2= 9.7$ A

2.6 Influence de l'éclairement et de la température sur le comportement d'un générateur PV

L'éclairement et la température ont un impact direct et non négligeable sur les courbes I - V et P - V d'un panneau solaire photovoltaïque. Au fait une petite partie de l'éclairement qui atteint le module est convertie en électricité, le reste de l'énergie incidente se convertit en chaleur. Pour montrer ces influences, nous allons simuler les caractéristique I - V et P - V du groupement de la figure (2.31(a)), sous différentes conditions climatiques de températures et d'ensoleillements.

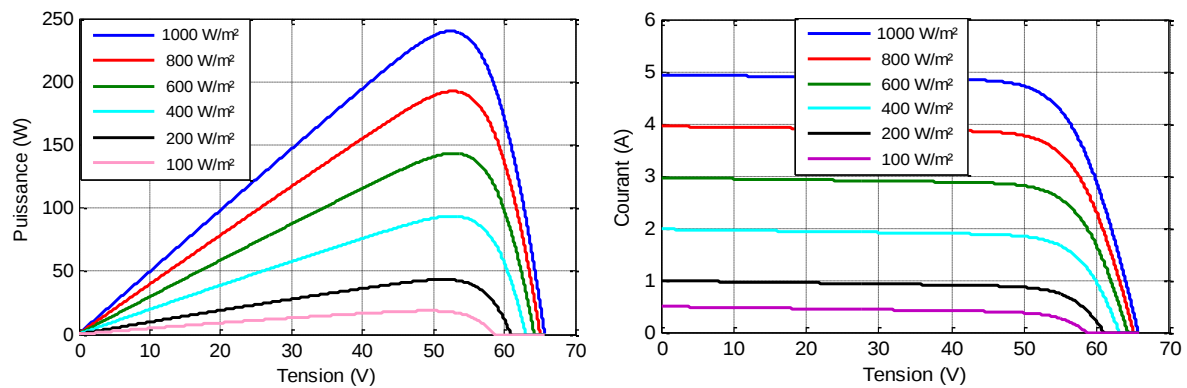
2.6.1. Influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules photovoltaïques. Quand la température diminue, la tension va augmenter, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres (figure 2.31). La diminution du courant de saturation I_0 est la principale cause de la chute de courant à basse température [50].

**Figure 2.31 :** (a) Courbes I-V(b) courbe P-V pour différentes températures avec $G=1000 \text{ W/m}^2$

6.2. Influence de l'éclairement

D'autre part, l'éclairement est un facteur qui influe sur le comportement d'un générateur PV.

**Figure 2.32 :** (a) Courbes P-V(b) courbe I-V pour différents éclaircements avec $T=25^\circ\text{C}$

Les Tableaux 2.2 et 2.3 récapitulent les résultats de simulation qui sont donnés comme suit :

$T(^{\circ}\text{C})$	$P_{\text{max}} \text{ (W)}$	$V_{\text{co}} \text{ (V)}$	$I_{\text{sc}} \text{ (A)}$
25	239.92	65.65	4.938
35	229.15	63.14	4.946
45	218.41	60.95	4.949
55	207.69	58.19	4.963
65	197.00	56.58	4.969
75	186.35	53.34	4.986
Augmentation de : 150%	Chute de :22%	Chute de :18%	Augmentation de : 01%

Tableau 2.2 : Résultats de simulation pour un groupement série ($N_{\text{ss}}=3$),
Avec différentes températures et $G=1000 \text{ W/m}^2$

$G (W/m^2)$	$P_{max} (W)$	$V_{co} (V)$	$I_{sc} (A)$
1000	239.92	65.65	4.93
800	192.33	65.06	3.94
600	143.48	64.21	2.96
400	93.57	63.04	1.97
200	42.58	60.90	0.98
100	16.42	58.56	0.48
Chute de : 90%	Chute de : 93%	Chute de : 10.7%	Chute de : 90%

Tableau 2.3 : Résultats de simulation pour un groupement série ($N_{ss}=3$), Avec différents éclairagements et $T=25^{\circ}C$

La figure 2.31, présente des courbes I - V et P - V pour différentes températures de fonctionnement, on remarque qu'elle a une influence négligeable sur la valeur de I_{sc} (augmentation de 1%). Par contre, V_{co} baisse assez fortement (chute de 18%) lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue (chute de 22%). La température est un paramètre important dans le comportement des cellules.

La figure 2.32, présente des courbes I - V et P - V pour différents éclairagements G . On remarque que la valeur de I_{sc} est directement proportionnelle à l'intensité de G , comme il est illustré dans le tableau 2.3. Par contre, V_{co} ne varie pas dans les mêmes proportions, sa variation est faible.

2.7 Conclusion

Nous avons établi le modèle mathématique de la chaîne de conversion éolienne (vent, turbine, multiplicateur, l'arbre de la machine et de la Génératrice Asynchrone) et simulé le modèle obtenu sous Matlab/Simulink, pour étudier son fonctionnement. Les résultats obtenus montrent que le système éolien à base de génératrice asynchrone permet d'avoir une alimentation triphasée à amplitude oscillatoire.

D'autre part, la cellule solaire photovoltaïque à une diode a été modélisée car c'est l'unité de conversion la plus adaptée à l'effet photovoltaïque. La réduction des coûts de production peut être obtenue, soit en augmentant le rendement des cellules solaires, soit en trouvant des procédés alternatifs moins coûteux en énergie/matériaux. De nombreuses filières sont

explorées : les cellules à haut rendement au Si cristallin, en couches minces/ultraminces, à colorant et assimilées, organiques, hybrides et les dispositifs de troisième génération à très haut rendement potentiel.

L'assemblage des modules photovoltaïques nous permet de réaliser le générateur photovoltaïque adéquat pour une alimentation voulue. L'ensoleillement et la température sont des facteurs influents sur le rendement d'un générateur photovoltaïque.

3.1 Introduction

Il est impératif aujourd'hui que les réseaux électriques actuels vont connaître dans les années à venir un changement dans leurs structures, afin de permettre l'insertion des énergies renouvelables. Le développement de ces derniers va nous garantir de l'énergie propre, durable et inépuisable. Il est donc, nécessaire de continuer à assurer le meilleur équilibre entre la production et la consommation. La fusion des réseaux électriques avec la télécommunication va changer la face du réseau électrique et offre un réseau électrique intelligent.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents aspects des réseaux électriques intelligents, ainsi que ses différentes caractéristiques et contraintes liée à leur mise en œuvre. Aussi nous allons donner un aperçu sur les différents composants de ces systèmes.

3.2 Contrainte d'intégration des énergies renouvelables

Le problème majeur des énergies renouvelables qui sont des sources intermittentes et dépendent de la météo et de l'environnement. Ce qui pose un problème d'approvisionnement et de fourniture de l'énergie électrique de façon permanent et efficace. La solution de ces inconvénients se trouve dans les réseaux électriques intelligents [51].

3.3 Les raisons de recours au réseau électrique intelligent

Les raisons qui nous obligent de passer du réseau électrique classique au réseau électrique intelligent sont les suivant :

- Intégrations des énergies renouvelables qui sont inépuisables, durables et non polluantes [51]
- La pollution et le réchauffement climatique sont des motivations qui nous pousse au passage des énergies conventionnelles (fossile, gaz naturel, uranium...) au réseau électrique intelligent.
- Augmentation de la consommation énergétique mondiale et besoin d'énergie électrique des pays pour garantir l'appauvrissement en énergie électrique.
- Diminution des ressources naturel non renouvelable tel que le fossile, le gaz naturel.

3.4 Nécessité d'une nouvelle approche

La distribution de l'énergie électrique se fait actuellement par l'intermédiaire de l'opérateur du réseau. La consommation stimule la dynamique du réseau électrique, ce qui nous oblige à passer à une situation où l'offre de production va prendre une place importance

dans la conduite du réseau. Ceci nécessite une interaction importante avec les plus grands consommateurs.

La vision du réseau électrique intelligent est le concept d'un modèle qui va nous permettre d'avoir des avantages et des biens faits pour garantir une énergie durable. Les technologies de communication envisageables pour permettre l'interaction avec les clients sont soit dédiées et déployées généralement via un investissement du gestionnaire du réseau électrique ou bien elles doivent s'appuyer sur Internet ou le réseau cellulaire [51].

3.5. Réseaux électriques intelligents

La proposition des solutions opérationnelles pour le bon fonctionnement des réseaux électriques futur est plus que nécessaire, les nouvelles technologies de l'information et de la communication apportent de nouvelles opportunités de modernisation. Ce que l'on a remarqué par l'important développement qu'elles ont connu ces dernières années. Elles offrent une alternative pour faire évoluer l'exploitation des réseaux électriques en les aidants à les rendre plus intelligents, étant donné que le déploiement de l'intelligence a besoin de la communication. Elles offrent les moyens de rendre les réseaux de distribution plus flexibles et actifs dans le sens où des solutions technologiques modernes permettent un contrôle accru du réseau électrique. C'est dans ce contexte qu'a émergé le concept des réseaux électriques intelligents pour accompagner l'évolution vers les réseaux du futur.

Les nouvelles technologies de l'information et de la communication vont aider le réseau électrique classique afin de le rendre de plus en plus intelligent avec trois objectifs principaux: l'accessibilité, la fiabilité et l'efficacité dans l'approvisionnement de l'énergie électrique aux consommateurs. La vision des réseaux intelligents regroupe entre autres les politiques pour l'intégration de nouveaux usages, des nouvelles technologies de production et de stockage, de nouvelles fonctions avancées de conduite avec une présence croissante de dispositifs électroniques intelligents.

Le terme Smart grids est reconnu officiellement dans la littérature de l'énergie électrique comme désignant les réseaux électriques intelligents. Cette notion a été adopté par la communauté internationale [52] offrent une définition précise de ce concept : « des réseaux électriques, qui intègrent intelligemment les actions des producteurs et des consommateurs qui y sont connectés, afin d'offrir un approvisionnement en électricité efficace, durable et économique en toute sécurité ». Il existe néanmoins autant de définitions que d'acteurs mais

tous sont d'avis que l'intelligence au service des réseaux de distribution doit remplir plus ou moins les fonctions suivant [51] :

- Faciliter l'intégration des sources de production d'énergie renouvelable.
- Permettre aux consommateurs de jouer un rôle dans l'optimisation du fonctionnement du système.
- Fournir plus d'informations aux consommateurs.
- Réduire de manière significative l'impact environnemental.
- Maintenir les niveaux élevés actuels de la fiabilité du système, la qualité et la sécurité d'approvisionnement.
- Maintenir les services existants de manière efficace.
- Favoriser le développement d'un marché intégré.

3.6 Caractéristiques du réseau électrique intelligent

Il est défini par les caractéristiques suivantes [54-53] :

- Équilibre entre l'offre et la demande,
- Auto-cicatrisation,
- Réduction des pertes,
- Minimisation des sollicitations matérielles
- Régulation de la tension.
- Contrôle du réseau électrique.
- Sécurité informatique,

3.6.1 Équilibre entre l'offre et la demande

Dans le but de garantir l'approvisionnement de l'énergie électrique au client et satisfaire sa demande, on est dans l'obligation de la produire en quantité suffisante à toute heures et surtout pendant les heures de pointe ou la charge est maximale.

3.6.2 Auto-cicatrisation

L'une des caractéristiques du réseau électrique intelligent, est qu'il est capable de détecter et résoudre des problèmes rencontrés, les pannes de courant sont inévitables, mais il est possible de les détecter avant qu'elles ne se produisent.

3.6.3 Réduction des pertes

Le rôle du réseau électrique intelligent est de pouvoir contribuer à minimiser les pertes, du généralement à l'effet de joule, plus les lignes sont longues, plus les pertes d'énergie sont élevées [55].

3.6.4 Minimisation des sollicitations matérielles

L'objectif du réseau électrique intelligent est de limiter la quantité de sollicitations faites sur le matériel afin de minimiser le coût résultant de l'usure des équipements [55].

3.6.5 Régulation de tension

Le processus la régulation de la tension consiste à prendre un ensemble de valeurs de la tension afin de s'assurer que les tensions à des points spécifiques sont dans l'intervalle garanti par le gestionnaire de réseau [55].

3.6.6 Contrôle du réseau électrique.

Le contrôle du réseau électrique de manière efficace est une caractéristique importante, il est nécessaire d'identifier les points qui sont contrôlables. Le contrôle de la tension se fait généralement aux postes sources et aux producteurs décentralisés. Il est possible de faire une partie de la régulation au niveau des transformateurs Moyenne Tension et Basse Tension, De plus, la consommation d'énergie électrique par les clients a un impact important sur la chute de tension dans le réseau. L'option utilisée est de proposer aux clients de changer la façon dont ils consomment comme cela est fait lors des heures creuses [55].

3.6.7 Sécurité Informatique

Le système de communication du réseau électrique intelligent est vulnérable aux attaques informatiques. Pour se protéger contre les pannes de courant dues à des attaques malveillantes ou par un capteur défectueux, il est nécessaire de prendre en compte la sécurité dans le réseau électrique intelligent. En plus, de la protection contre les attaques informatiques, il doit également protéger les données du client.

3.7. Enjeu du réseau électrique intelligent

Le développement des réseaux électriques intelligents présente un certain nombre d'enjeux :

3.7.1. Enjeu Industriel

Il est important d'assurer une fonctionnalité de tous les éléments qui y ont un rôle dans le développement, la modification, amélioration et l'arrangement du réseau électrique intelligent avec l'adaptation des matériaux nécessaire [56].

3.7.2. Enjeu social

Les consommateurs sont impliqués dans la gestion de leurs consommations grâce à un compteur intelligent. Ils interagissent avec le réseau électrique intelligent ce qui donne une nouvelle méthode de communication entre le client et le réseau électrique intelligent [56].

3.7.3. Enjeu économique

Une nouvelle coopération économique se dessine et prend chemin entre les différents acteurs du secteur de l'énergie électrique. Le rôle des états dans le développement des réseaux électriques intelligents en tant que service public est primordiale [56].

3.7.4. Enjeu environnementale

L'intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique permet la réduction au maximum des impacts sur le réchauffement climatique et les perturbations qui touchent l'environnement.

3.8. Utilité du réseau intelligent

Les technologies du réseau électrique intelligent cherchent à ajuster en temps réel la production et la distribution de l'énergie électrique en hiérarchisant les besoins de consommation selon leur urgence [57]:

- Optimiser le rendement des centrales électriques ;
- Éviter de construire de nouvelles lignes ;
- Minimiser les pertes en ligne ;
- Optimiser l'insertion des sources d'énergies renouvelables ;
- Diminuer les problèmes liés à l'intermittence de certaines source d'énergie renouvelable ;

3.9. Objectif du réseau électrique intelligent

L'objectif principal associé à ses réseaux électriques intelligents, pour qu'elles deviennent des réseaux modernes se doivent [58] :

- De faire participer de façon active les consommateurs,
- D'accueillir l'ensemble des générateurs,
- De permettre de nouveaux produits,
- D'offrir une qualité d'énergie,
- D'optimiser l'utilisation de l'existant et de fonctionner efficacement,
- D'anticiper et de répondre à des perturbations sur le système,

- De résister aux attaques ou aux catastrophes naturelles.

3.9.1 Mise à niveau de l'heure de la tarification

Afin réduire la demande de consommation pendant les périodes de pointes, il existe des moyens de communications et de technologies de mesure, pour informer les clients et les entreprises lorsque la demande d'énergie est élevée. Elle donne également aux entreprises de service publique la possibilité de réduire la consommation en communiquant avec des dispositifs directement, afin d'éviter les surcharges du réseau [58].

3.10 Types de réseaux intelligents

On peut distinguer trois catégories de démarches "réseaux intelligents"

3.10.1. Au niveau des gestionnaires de réseaux de transport

Le gestionnaire de réseau de transport doit améliorer le télé-contrôle, la surveillance, la planification et la prévision. Il doit poursuivre une évolution entamée de longue date en utilisant les progrès technologiques pour faire face aux nouveaux besoins de transport, surtout suite à l'apport en réseaux de la production décentralisée.

3.10.2. Au niveau des gestionnaires de réseaux de distribution

Le développement de la production décentralisée impose aux gestionnaires de réseaux de distribution de mettre en place des technologies de télé-contrôle, de protections bidirectionnelles, de gestion d'équilibre. Il s'agit de mettre en œuvre l'installation de technologies disponibles de longue date. Cette évolution est facilitée par la baisse du coût de ces technologies [59].

3.10.3. Au niveau du client

L'électronique, l'informatique et les télécommunications ouvrent de nouveaux horizons à la gestion de la consommation et de la production locale ce domaine spécifique s'appelle maison intelligente [59].

Un réseau électrique intelligent est un réseau qui est capable d'intégrer au meilleur coût les comportements et les actions de tous les utilisateurs qui y sont reliés (producteurs / consommateurs) ainsi que ceux qui sont les deux à la fois. L'objectif est d'assurer au système électrique d'être durable et rentable, avec des pertes faibles et avec des niveaux élevés de sécurité, de fiabilité et de qualité de la fourniture, il est composé essentiellement d'une ville intelligente dont l'élément essentiel est la maison intelligente ou se trouve un compteur intelligent, d'un serveur de ville, d'un serveur principale figure (3.1). [59].



Figure 3.1 : *Exemple de réseaux électriques intelligents [72].*

3.11. Ville intelligente

Elle désigne une ville utilisant les technologies de l'information et de la communication pour améliorer la qualité des services urbains ou encore réduire ses coûts. Ce concept émergent désigne un type de développement urbain apte à répondre à l'évolution ou l'émergence des besoins des institutions, des entreprises et des citoyens, tant sur le plan économique, social, qu'environnemental.

Une ville est qualifiée d'intelligente quand les investissements en capitaux humains, sociaux, en infrastructures d'énergie électricité, de flux alimentent un développement économique durable ainsi qu'une qualité de vie élevée, avec une gestion avisée des ressources naturelles, au moyen d'une gouvernance participative et d'une utilisation efficiente et intégrée des technologies de l'information et de la communication. Une ville intelligente serait capable de mettre en œuvre une gestion des infrastructures communicantes, adaptables, durables et plus efficaces, automatisées pour améliorer la qualité de vie des citoyens, dans le respect de l'environnement [59].

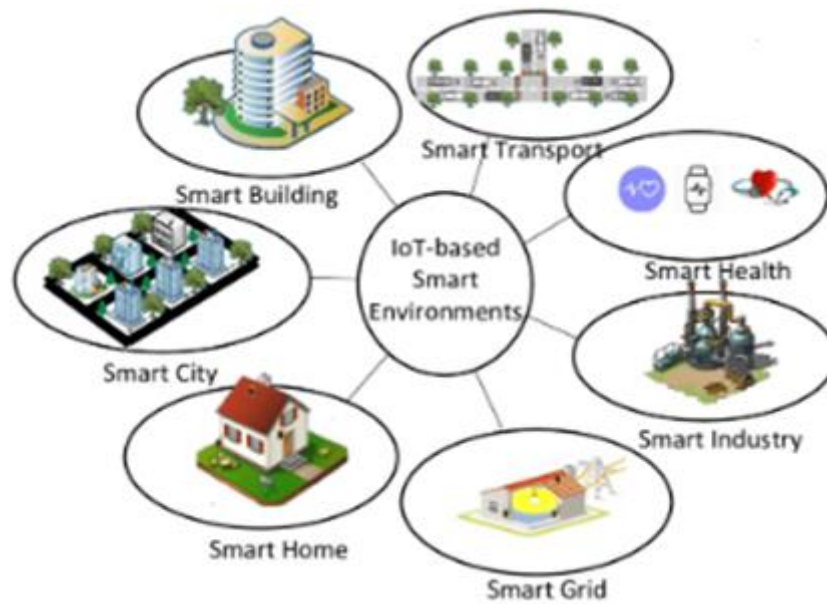


Figure 3.2 : Du "Smart Grid" au "Smart Home" en passant par le « Smart City » [59].

3.11.1 Maison intelligente

Elle est basée sur un concept simple; les appareils peuvent communiquer entre eux ou avec un système de contrôle central automatisé [60]. Pour communiquer, deux types de technologies sont possibles: câbles ou sans fil voir figure (3.3).

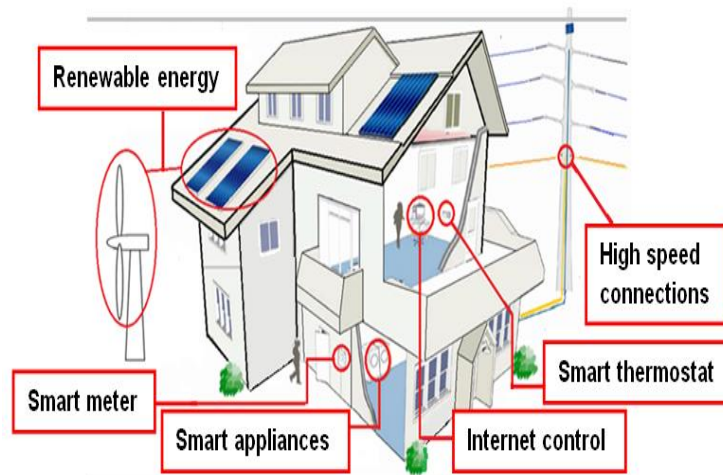


Figure 3.3 : Un modèle de maison intelligente

Pour la définir, Ken Saka mura énonce les critères d'exclusion suivants : « Une maison sera disqualifiée au regard du classement dans la catégorie des maisons intelligentes si :

- L'information ne peut pas circuler librement de l'intérieur de la maison vers le monde extérieur, et vice-versa;

- Si la maison fonctionne avec des ordinateurs intégrés qui ne peuvent pas se parler entre eux ;
- Si sa dogmatisation consiste en un « patchwork » de « gadgets » ;
- Si elle est équipée avec des fonctions sophistiquées difficiles à utiliser.

3.11.2 Serveur de ville

Le serveur de la ville est l'élément essentiel des réseaux électriques intelligents pour gérer l'énergie électrique. Il se compose d'un ordinateur central et d'un serveur complet capable de prendre des décisions pour tous ses utilisateurs. Il utilise le réseau téléphonique public commuté pour communiquer avec le serveur principal [62-61].

3.11.3 Serveur principale

Il assure la communication bidirectionnelle avec les compteurs intelligents installés dans les foyers. Il traite et gère des données recueillies qui sont traitées, validées et stockées dans une base de données centrale [64-62].

3.12. Compteur intelligent électrique

La mise en œuvre des réseaux électrique intelligents nécessite l'utilisation de moyen de communication et télémétrie, tel que le compteur intelligent. C'est un compteur disposant de technologies avancées ; qui identifient de manière plus détaillée et précise, et éventuellement en temps réel la consommation énergétique. Ils sont capables de donner une facturation par tranches horaire et permettent aux consommateurs de choisir le meilleur tarif chez les déferentes entreprises productrices [16].

En plus, il joue sur les heures de consommation qui admettent ainsi une meilleure utilisation du réseau électrique. Un tel système permettrait aussi de cartographier plus finement les consommations et de mieux anticiper les besoins a des échelles plus locales. Ils acceptent aussi de repérer les postes qui coutent le plus au client ils peuvent éventuellement l'informer des microcoupures ou des pertes sur les réseaux électriques.

Le problème principal de ces compteurs est celui de la communication, qui doit pouvoir être fiable et automatique, dans un réseau donc communicationnel ou circuleront en permanence des milliards de données affluant vers un ou quelques nœuds centraux (vers les gestionnaires des données de comptages ou les utilities). Selon les cas (urbain, rural, zone d'activité, zones isolées, etc.), on a songé à utiliser les antennes relais des téléphones mobiles,

les ondes radio, les lignes électriques ou téléphonique, les solutions wifi et internet ou la combinaison de plusieurs de ces solutions.

Le compteur intelligent est la première étape vers un réseau électrique intelligent ; le déploiement de compteurs évolués associés à un premier réseau télécommunication bidirectionnel, est la pierre angulaire des futurs réseaux électriques.

3.12.1. Modèle de système de comptage

Un système de comptage implique :

- La mise en place de compteurs communicants capables de stocker les informations mesurées.
- L'établissement de systèmes de transmission de données permettant la circulation rapide et fiable des informations contenues dans les compteurs entre les utilisateurs, le gestionnaire de réseaux et les fournisseurs.

Le compteur est doté de capacités de communication bidirectionnelle et permet la relève à distance ainsi que le pilotage de la fourniture d'énergie. Comme le montre la figure (3.4) la communication s'effectue entre un ensemble de compteurs installés chez les utilisateurs et un concentrateur localisé à proximité dans le poste de distribution via la technologie du courant porteur en ligne. Qui rassemble ces données pour les transmettre au gestionnaire du réseau [66].

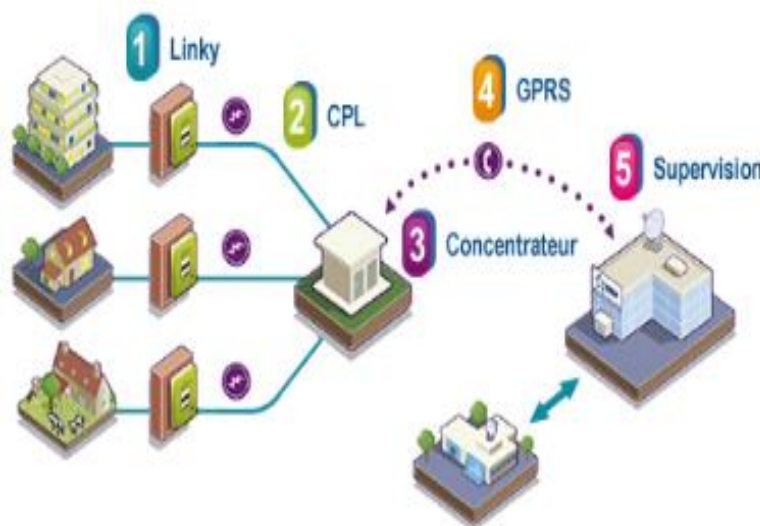


Figure 3.4 : Un système de compteurs communicants [66]

3.12.2. Fonctionnalités des systèmes de comptage.

Les compteurs intelligents doivent être capables d'assurer :

- Relève les données du compteur à intervalle de temps régulier.
- La télé-relève.
- La gestion de compteurs à distances par le gestionnaire de réseau de distribution.
- La mesure de la consommation pour une gestion décentralisée de la production.
- La gestion à distance des paramètres du compteur
- Le transfert des messages à distance des acteurs du marché pour le client
- L'affichage des informations sur le compteur
- Un port de communication principal permettant le transfert d'information via le courant porteur en ligne.
- La mesure de la qualité y compris la continuité de l'approvisionnement et la qualité de tension

3.13 Technologie de communication de réseau intelligent

La fusion du réseau électrique classique avec les technologies de communication, nous offre un nouveau système dit réseau électrique intelligent. On applique les meilleures méthodes de communication à toutes les lignes des réseaux électriques pour obtenir les systèmes de distribution et de transmission les plus efficaces. Actuellement, le point le plus important est la réalisation d'une architecture de système de communication qui offre un alternatif pour les systèmes interconnectés.

3.13.1 ZigBee

Il est basé sur la norme IEEE 802.15.4 et contribue à la création de réseaux sans fil personnels à faible coût d'infrastructure, à faible taux de transfert et à faible consommation d'énergie [67]. Il présente des avantages de longue durée de vie de la batterie, une construction de réseau requise, son inconvénient de ne pas pouvoir fournir un flux de données dans des tailles plus grandes que Bluetooth et Wi-Fi. Il convient aux maisons intelligentes. [68].

3.13.2 WiMax

WiMax fait partie de la série standard 802.16 pour le réseau métropolitain sans fil (WMAN) [69]. Selon ces normes, il a défini la large plage de fonctionnement de 10 à 66 GHz pour l'infrastructure de communication [69].

3.13.3 Communication cellulaire

La communication cellulaire utilise les normes 2G définies pour la bande 1,9 GHz et dispose de licences GSM, IS-36 et IS-95. La technologie cellulaire 3G et 4G fonctionne sur une gamme de spectre de 824 à 894 MHz / 1 900 MHz [6]. Elle utilise aussi la dernière technologie avec les normes LTE et LTE-A [71]. Sa fonction distincte des autres technologies de communication sans fil, le rendent plus applicable au réseau intelligent. Elle a une capacité de volume élevé qui peut déplacer d'énormes quantités de données sur les applications de réseau intelligent [72-71].

3.13.4 Communication avec fil

L'infrastructure de communication avec fil est composée en fibre optique et API (Application Programming Interface ou Interface de Programmation). Les défis et les avantages de ces méthodes ont été soigneusement étudiés. Les réseaux électriques intelligents peuvent être inclus des HAN (home area network), des LAN (local area network ou en français réseau local), des réseaux filaires et sans fil qui connectent les systèmes de production d'électricité aux consommateurs finaux afin de prendre en charge une large gamme d'applications de communication et de contrôle, y compris la réponse à la demande et l'automatisation de la distribution [72].

3.13.5 La fibre optique

Les compagnies d'électricité qui gère le réseau électrique peuvent atteindre un niveau de communication haut débit grâce à la technologie de la fibre optique. Malgré que ce dernier présente un désavantage de coût de configuration initial élevé, il n'est pas affecté par les champs électromagnétiques et la communication avec fil présente tous les avantages de la sécurité grâce aux privilèges préférés des applications de réseau intelligent. Il n'est pas possible de voler des informations parce que la confidentialité et la sécurité sont très bonnes sur le câble à fibre [73].

3.13.6 Communication par ligne électrique

Les systèmes de communication par ligne électrique possède tous les avantages du câble à fibre optique avec une communication rapide des données ainsi que la sécurité des méthodes de communication sans fil. Elle présente non seulement une connexion Internet, mais également tous les appareils connectés au réseau sur une ligne électrique. elle peut également contrôler l'actif et la passivité des lignes de distribution. Ceci est essentiel en particulier pour les sous-stations situées dans des zones de pays où il n'y a pas d'infrastructure de communication [74].

Le tableau 3.1 résume la comparaison des communications avec et sans fil.

Technologie	Avantages	Inconvénients
Communication par ligne électrique	Rentable Infrastructure disponible Couverture étendue Sécurité haute capacité	Atténuation du signal Bruit élevé
Fibre optique	Caractéristiques stables Grande capacité	Coût
Sans fil	Installation rapide Technologie mature	Couverture limitée Coût Sécurité Capacité et Long délai

Tableau 3.1. Comparaison des communications avec et sans fil [75-74]

3.14. Comparaison des réseaux classiques et des réseaux électriques intelligents

Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques qui distinguent les réseaux électriques classiques et les réseaux électriques intelligents.

Caractéristiques	Réseaux électrique	Réseaux électriques intelligent
Participation des clients	Ils ne sont pas informés et ne Participent.	Ils sont informés et actifs
Intégration de source d'énergie	Dominé par le producteur d'énergie centralisée	Déploiement d'un grand nombre de producteurs distribués
Nouveaux produit services et marchés	Limité, peut d'intégration marché pour les clients	Variété d'intégration du marché de l'énergie pour le client
Qualité de l'énergie	Centrée sur les pannes, réponse lente aux problèmes et opérationnelles de gestion d'actif	Priorité sur l'énergie avec une variété de qualité et une rapidité de résolution du problème
Optimisation des actifs	Peu d'intégration des données opérationnelles de gestion d'actifs	Nombreuse acquisition de données élargies et des paramètres du réseau
Auto cicatrisation	Prévention pour réduire l'impact des dégâts en se concentrant sur la protection des infrastructures suite à une panne	Détection automatique et réparation des problèmes centrés sur la prévention pour minimisé l'impact sur le client.
Résistance aux attaques	Vulnérables aux attaques	Résistance aux attaques avec restaurations rapides en cas de problèmes

Tableau 3.2. Comparaison des réseaux électriques classiques et du réseau électrique intelligent [75].

3.15. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu l'importance des réseaux électriques intelligents ou encore les Smart Grid qui ont apporté la solution optimale quant à l'intégration des énergies renouvelables. Le domaine des télécommunications est fortement présent et constitue la composante essentielle dans la gestion optimale des puissances dans les réseaux électriques. Le compteur intelligent présente le relai incontournable qui assure la communication entre les différents composants du REI pour garantir leur bon fonctionnement. L'ensemble de ces éléments nécessite une infrastructure bien appropriée pour la gestion des ressources plus étendue et qui permet d'équilibrer la demande à la production centralisée et décentralisée

4.1 Introduction

Les réseaux électriques intelligents ont un rôle important dans la réduction de la consommation des clients, d'équilibrer l'offre et la demande et d'intégrer les énergies renouvelables ainsi que nouvelles technologies. Leurs fonctions est d'assurer les commandes de besoins énergétiques, d'optimiser les flux énergétique, d'effectuer les maintenances préventives, de contrôler les permutations et de minimiser les charges afin de réduire le cout d'investissements. L'optimisation de l'ensemble des composants du réseau électrique intelligent doit répondre à certains critères, à la complexité due aux systèmes distribués et aux objectifs tracés [76]. Les réseaux électriques intelligents présentent de nombreuses manières complexes à résoudre [78-77] :

- La non-linéarité des systèmes électriques, notamment en présence des énergies renouvelables aux niveaux des consommateurs. .
- Incertitude concernant la production et la consommation d'énergie électrique.
- La disponibilité de l'énergie produite par les énergies renouvelables,
- Les évènements imprévus d'origine humaine ou naturelle

Dans ce chapitre, nous allons aborder l'étude de l'ensemble des éléments du réseau électrique. Le modèle proposé est un outil d'aide à la conception d'un réseau électrique intelligent, Dans un premier temps, nous proposerons un modèle en prenant en compte l'échange de puissance entre les consommateurs et le réseau électrique ensuite nous passerons à l'échange de puissances entre les clients.

4.2 Approvisionnement de l'énergie dans un foyer

Les compteurs intelligents sont en mesure de compter l'énergie produite, de gérer la puissance et de piloter la courbe de charge. Ils ont une communication bidirectionnelle qui les rend pilotables à distance. Les consommateurs ont, tout le temps, une meilleure appréhension de leur consommation [79].

4.2.1 Gestion des appareils

Afin d'optimiser la consommation de l'énergie électrique, chaque appareil se trouvant dans la maison est indiqué par une variable de priorité de fonctionnement. Elle lui fournit de l'énergie nécessaire pour son fonctionnement. La mise en place d'un modèle de priorité de fonctionnement va réguler les pics de consommation et équilibrer les creux. La variable dépendra de l'importance de l'appareil au niveau de la maison, de sa consommation et de son

temps de fonctionnement. Les appareils de première nécessité qu'ils sont essentiels pour les clients ont la priorité de fonctionnement. Cette dernière est gérée par le contrôleur se trouvant au niveau des foyers [80]. La gestion des alternances des priorités de fonctionnement est essentielle pour le bon fonctionnement du réseau électrique intelligent. Citons les différentes gestions :

- Gestion par fonction interne : Chaque appareil agit séparément des autres appareils.
- Gestion par rétroaction : Les contraintes externes influencent les données en début de chaque itération.

La consommation d'énergie électrique par appareil est fournie par le gestionnaire du réseau électrique. Les horaires de consommation des appareils sont observés sur les courbes de charge. Ils offriront les données d'entrée lors de la mise à jour à chaque répétition. Dans le but de rendre le modèle dynamique, indiquant un réseau intelligent, les rétroactions des données en top-down examineront les priorités des appareils, en les modifiant au cours d'une itération afin d'optimiser la consommation.

4.2.2 Évaluation de la consommation

4.2.2.1 Choix de la méthode

Les données de consommation et de priorité sont les appareils ainsi que les prévisions. Le but est de distribuer l'énergie en fonction des priorités de consommation sans dépasser celle obtenue. La méthode consiste en sa répartition entre les appareils. La résolution de la difficulté se fait grâce à la méthode de Knapsack, un sac à dos est rempli sans dépasser sa capacité et en maximisant la priorité des objets pris.

Vu les données qui sont la consommation, la priorité et les pronostics, la difficulté du sac à dos est la plus adéquate parce qu'elle correspond à notre problème. La charge maximale du sac à dos est l'énergie reçue et la priorité des objets en fonction de leur consommation. La charge additionnelle affaiblit les capacités du réseau électrique intelligent [81].

4.2.2.2 Méthode de calcul

On commence par la mise à jour des données de consommation, de production et de distribution. Chaque foyer compare ses valeurs de consommation par rapport aux pronostics calculés précédemment (figure 4.1) :

- Chaque foyer met à jour sa consommation par rapport aux données fournis par les capteurs.
- Chaque foyer compare sa consommation par rapport aux pronostics.
- En fonction des résultats, si la consommation est conforme aux prévisions, alors elle est retenue comme référence.
- Si, un problème de sac à dos surgit, ce dernier est envoyée au niveau gestionnaire du réseau électrique

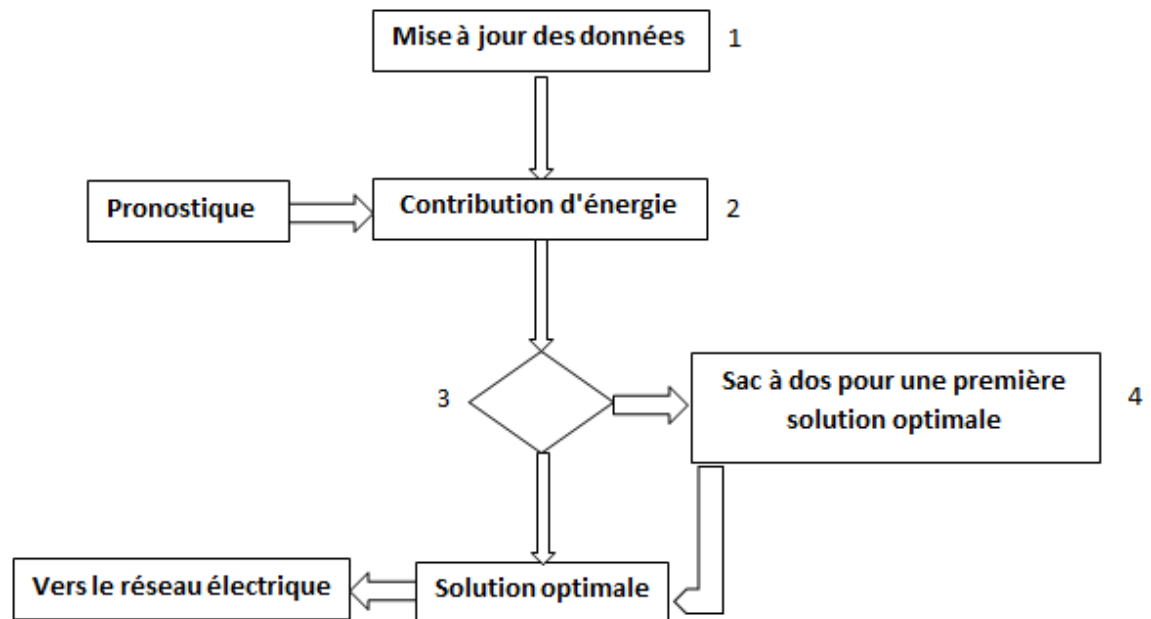


Figure 4.1 : Algorithme de résolution par la méthode de sac à dos

4.2.3 Résolution par programmation dynamique

La programmation dynamique est une méthode qui sert à réaliser un algorithme pour résoudre les problèmes d'optimisation. Vu qu'il existe plusieurs solutions envisageables, l'algorithme doit procurer la meilleure solution possible. C'est une méthode de résolution des problèmes qui satisferont le fondement d'optimalité de Bellman [82].

4.2.3.1 Méthode d'approvisionnement de l'énergie

Les éléments de base de la méthode d'approvisionnement de l'énergie sont définis par :

- Les entrées sont le pronostic, la consommation et la priorité des appareils
- La sortie est la consommation moyenne de l'énergie électrique par le foyer.
- Les variables sont le nombre d'appareils contrôlés et la consommation minimum entre tous les appareils.
- Algorithme

Début

Pronostics $\rightarrow$ Consommation moyenne

Pour tout appareil a tel que priorité $P_a \leq 1$

Consommation min = consommation appareil a

Fin Pour Tout

Si consommation min $\leq$ consommation moyenne

Fin algorithme

Sinon

Consommation moyenne = 0

Calculer la consommation minimum entre les appareils

~~consommation~~ $\leftarrow \frac{\text{consommation}}{\min}$

Pour $1 \leq i \leq a$

~~consommation~~ $\leftarrow \frac{\text{consommation}}{\min}$

Fin Pour

Effectuer Sac à dos (consommation moyenne, a) $\rightarrow$ consommation moyenne

Fin Si

Fin

4.2.3.2 Méthode de consommation de l'énergie

Les éléments de base de la méthode de la consommation de l'énergie sont définis par :

- Les entrées sont la consommation et la priorité des appareils.
- La sortie est la consommation moyenne de l'énergie électrique par foyer.
- Les variables est le nombre d'appareil contrôlé
- Algorithme

Début

Consommation moyenne = 0

Pour chaque appareil dont $P_a > 0$

~~consommation~~ $\leftarrow \text{consommation} * \min$

Fin Pour

Pour chaque élément dont $P_a = 0$ et $a_i \in$ sac optimal

Consommation moyenne = consommation moyenne + consommation a

Fin Pour

Fin

4.3 Gestion de l'offre et de la demande

La difficulté de gérer l'offre et la demande de l'énergie électrique est compliquée. La méthode d'optimisation ne peut pas tenir en compte l'aspect dynamique du réseau. La solution peut créer de grand écart de répartition de la consommation, et ainsi délaissé une partie des consommateurs. La méthode ayant pour but de gérer l'offre et la demande de façon intelligente doit donc être dynamique [81].

4.4 Difficulté de la gestion de l'offre et la demande

4.4.1 Choix de la méthode optimale

Tous les foyers ont besoin de l'énergie, ils cherchent donc le meilleur moyen afin d'être approvisionner. La méthode utilisée dans la résolution de cette difficulté doit considérer les consommateurs et les producteurs afin d'obtenir la meilleure disposition possible [81].

Trois méthodes proposent des solutions pour la résolution de la difficulté:

- Méthode des enchères : Les clients ont des objectifs à remplir. Ils misent sur le meilleur avantage,
- Méthode de la difficulté de recherche : Soient deux ensembles d'éléments A et d'éléments B. Chaque a_i déclare ses préférences chez l'autre b_j et vice-versa. Le but est d'optimiser les gains pour chaque élément.
- Méthode de la théorie des jeux : Les clients ont divers manœuvres de consommation ou de distribution. L'objectif est de trouver un équilibre parmi eux.

4.4.2 Interaction entre consommateur et producteur

Les enchères sont aléatoires. Elles ont une valeur proche de la consommation moyenne du client. L'énergie reçue ne doit pas perturber les autres clients. Une enchère trop cher ou à faible coût perturbera à la fois le client, les voisins, le réseau électrique et peuvent mettre en danger la distribution de l'énergie dans le réseau [81]. Chaque client fait partie d'un ensemble de micro-réseau, délimité par la configuration en arbre du réseau. Le développement de la méthode est illustré par la figure (4.2) :

Le principe de la méthode consiste à recherche l'équilibre entre l'offre et la demande et définit par :

- Chaque client envoie sa consommation au micro-réseau.
- Un micro-réseau réalise une enchère pour chacun client.

- Le micro-réseau renvoie l'enchère au niveau du gestionnaire du réseau électrique
- Le gestionnaire du réseau électrique additionne les enchères de l'ensemble de clients desservies
- Attente de la réponse du gestionnaire du réseau électrique

Après avoir obtenu l'équilibre l'offre et la demande, il est essentiel que :

- Chaque client résout le problème de sac à dos avec l'énergie reçue.
- L'énergie en surplus est fournie au micro-réseau.
- Les statistiques sont mises à jour et les pronostics calculés pour la prochaine répétition.

La première étape forme l'action bottom-up. Le consensus est obtenu par rétroactions top-down successives. L'énergie finale est distribuée aux niveaux des foyers, puis les surplus sont fournis au réseau électrique. Cette distribution autorise une flexibilité de la répartition tout en garantissant l'énergie aux clients.

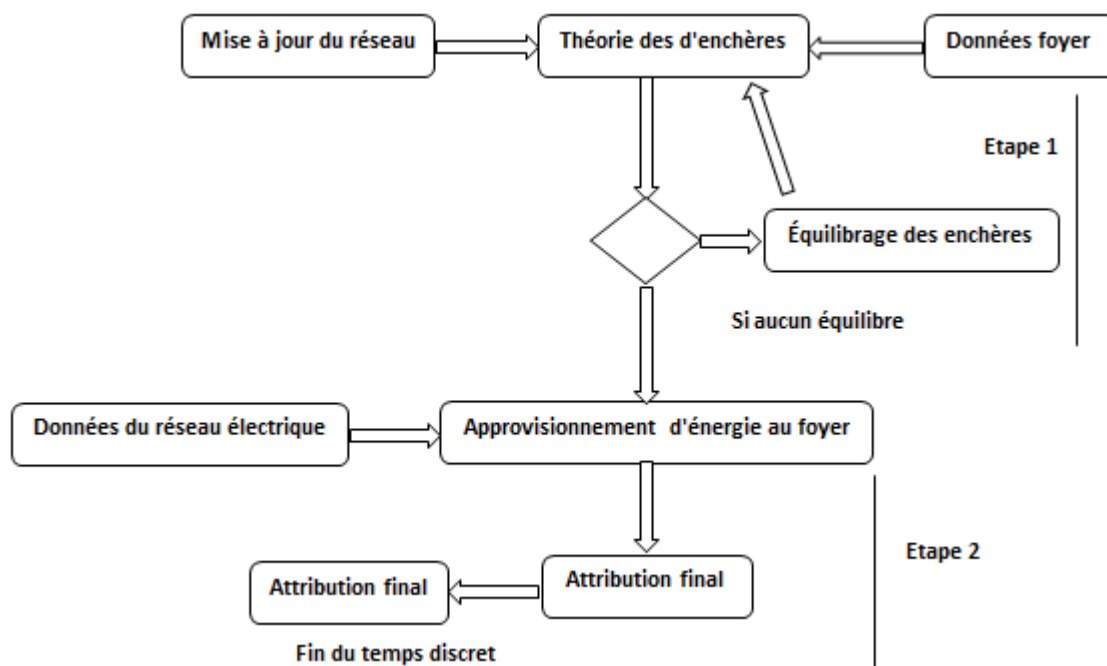


Figure 4.2 : Développement de la méthode au niveau du micro-réseau.

4.4.3 Algorithme des Enchères du micro-réseau.

Début

Consommation = 0

Pour chaque i niveau local

$$a(x^*) = ale[0..1]$$

$$X^* = \text{approximation}(x^*)$$

$$X_i = X^* * \frac{\varepsilon}{3} + \text{consommation}_i$$

Si $X_i < \text{consommation}_i$, alors $X_i = \text{consommation}_i$

Si $X_i > \text{consommation}_i$, alors $X_i = \text{consommation}_i$
 consommation_i

Stocker X_i

Fin Pour

Fin

4.5 Attribution finale

Après un nombre déterminé de rétroaction, le micro-réseau doit partager l'énergie obtenue des foyers. Pour cela, chaque foyer f s'est vu octroyer X_f d'après la dernière enchère accomplie. Chaque foyer effectue une difficulté de sac à dos avec pour dimension du sac $C = X_f$ et remonte les informations sur sa consommation auprès du micro-réseau. Ce dernier effectue un sac à dos avec l'énergie obtenue moins l'énergie déjà répartie parmi les appareils restant dans les foyers servis :

- Effectuer un problème de sac à dos au foyer.
- Additionner les énergies non attribuées.
- Retirer les appareils desservis.
- Effectuer un problème de sac à dos au micro-réseau.
- Offrir l'énergie au réseau électrique ou la distribuée à un quartier voisin

4.6 Analyse et contrôle de la puissance active

Le compteur intelligent recueille les informations de consommation d'énergie électrique d'une maison intelligente, et lui envoie également si nécessaire les commandes de contrôle. Les données générées par le compteur intelligent sont transmises à une agrégation de données. Cet agrégateur pourrait être un point d'accès ou passerelle. Ces données peuvent être acheminées vers l'utilitaire électrique ou le poste de distribution, la communication intelligente est responsable de la transmission d'informations figure (4.3) [83].

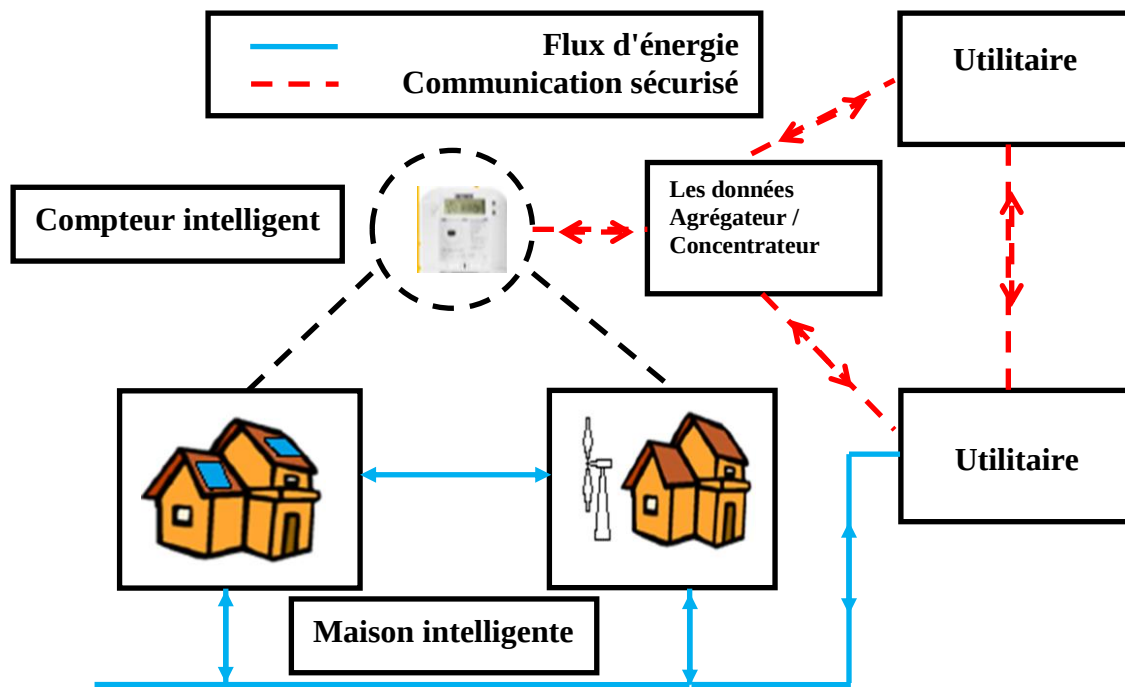


Figure 4.3 : *Echange de puissance et d'information dans un réseau électrique intelligent*

4.6.1 Rôle de l'Analyse des Flux de Puissance dans le Smart Grid

Le réseau électrique intelligent est un concept de réseau électrique capable de s'observer et de se contrôler de manière automatique. L'analyse des flux de puissance permet le dimensionnement des réseaux. Cette analyse est utilisée lors de la conception de nouveaux réseaux ou lors du changement de la topologie de réseaux existants pour s'assurer qu'ils seront en mesure de supporter la charge.

4.6.2 Organigramme d'un système intelligent.

Nous pouvons illustrer notre étude à partir d'un schéma global montrant les différents éléments d'un smart grid impliquée dans l'échange de puissances électriques, comme le montre la figure (4.4).

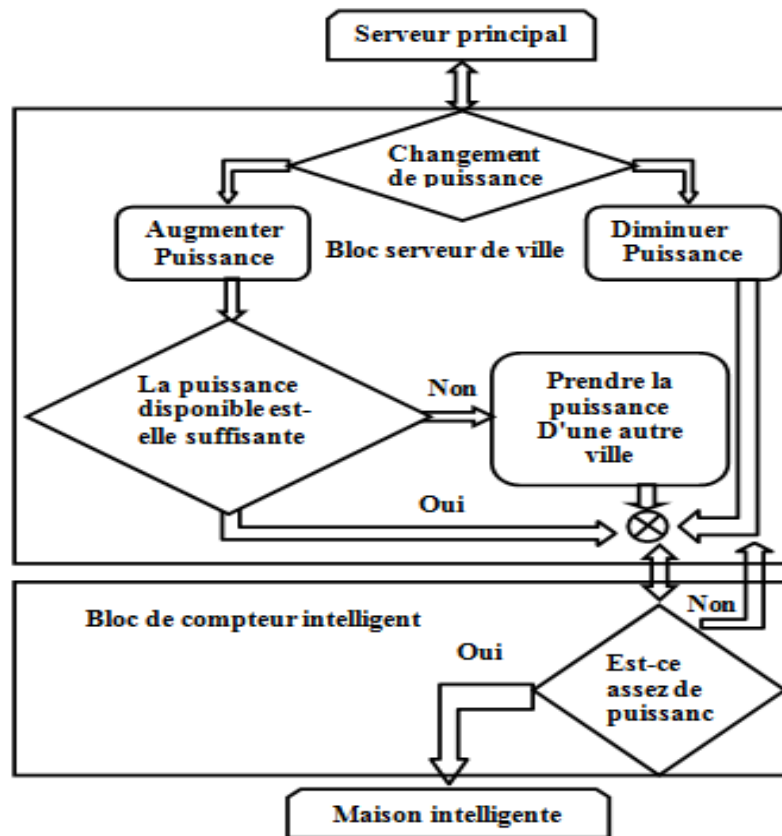


Figure 4.4 : Organigramme du système intelligent.

4.7 Système de stockage au niveau des consommateurs

La production d'énergie électrique par les systèmes photovoltaïque et éolienne est très fluctuante et dépend des conditions météorologiques, en raison du comportement irrégulier de la vitesse du vent et de l'irradiation solaire dans la nature, la production d'énergie à partir du photovoltaïque et de l'éolienne conduit plus de crainte dans l'exploitation d'un micro-réseau. Le principal défi lié à l'utilisation de l'énergie éolienne et solaire comme source d'énergie se trouve dans le fait que l'énergie éolienne comme le solaire peut ne pas être disponible en cas de besoin d'énergie. L'intégration du système de stockage d'énergie afin de réduire l'incertitude liée à la production solaire-éolienne améliorera la fiabilité et la sécurité de la production. Le système de stockage peut jouer un rôle capital dans la génération de l'énergie électrique et peut également être utilisé pour réduire les variations de la puissance de la charge.

Le stockage de l'énergie vise à résoudre les incertitudes suivantes :

- Le stockage de la production d'énergie excédentaire par rapport à la demande;
- La fourniture d'énergie pour compenser l'insuffisance due à la spécificité intermittente de l'offre ;

- La fourniture d'énergie pour prendre en charge un pic de consommation;
- La fourniture d'énergie en cas de défaillance du système électrique ;

Cependant, le choix d'une technologie de stockage dépend d'un certain nombre de critères à considérer :

- La puissance disponible;
- Le nombre de cycles de décharge;
- La sécurité du système;
- La densité de stockage;
- La maturité de la technologie
- Le coût d'investissement et de maintenance

Il est donc indispensable de bien déchiffrer les faits liés à l'utilisation, au fonctionnement et à la gestion d'un système de stockage pour optimiser l'état de santé et la durée de vie des accumulateurs. Ceci passe tout d'abord par une évaluation des besoins de la charge et un dimensionnement des différents sous-ensembles du système hybride solaire-éolien-stockage.

4.7.1 Intégration du système de stockage dans un système de production d'énergie renouvelable

Le stockage de l'énergie devient une particularité grandissante des systèmes actuels de production d'énergie électrique. Deux causes principales sont en jeu, la sécurité de l'approvisionnement et le soutien économique. En premier lieu, les systèmes de stockage d'énergie aident l'intégration de sources d'énergie renouvelable. En raison de leur caractère intermittent, l'intégration à grande échelle des sources d'énergie renouvelable dans les systèmes d'alimentation introduit des défis opérationnels, c'est-à-dire un équilibre entre la demande et l'offre d'énergie électrique. Le stockage de l'énergie électrique offre une solution en accompagnant l'offre à répondre à la demande, en améliorant le fonctionnement du réseau électrique et en économisant l'énergie électrique qui être gaspillée. En plus, il réduit le pic de consommation,

L'intégration d'un système de stockage d'énergie par batterie à un système solaire photovoltaïque ou à un système éolien (figure 4.5 et 4.6) peut rendre ces sources d'énergie renouvelables fluctuantes plus facilement accessibles.

Les contraintes de fonctionnement du système de stockage d'énergie par batterie sont ;

- Les limites d'état de charge,
- Les limites de courant de charge/décharge

- La durée de vie.

L'utilisation du système de stockage est reconnue comme une solution pour pallier la variabilité des sources d'énergie renouvelables dans les systèmes électriques.

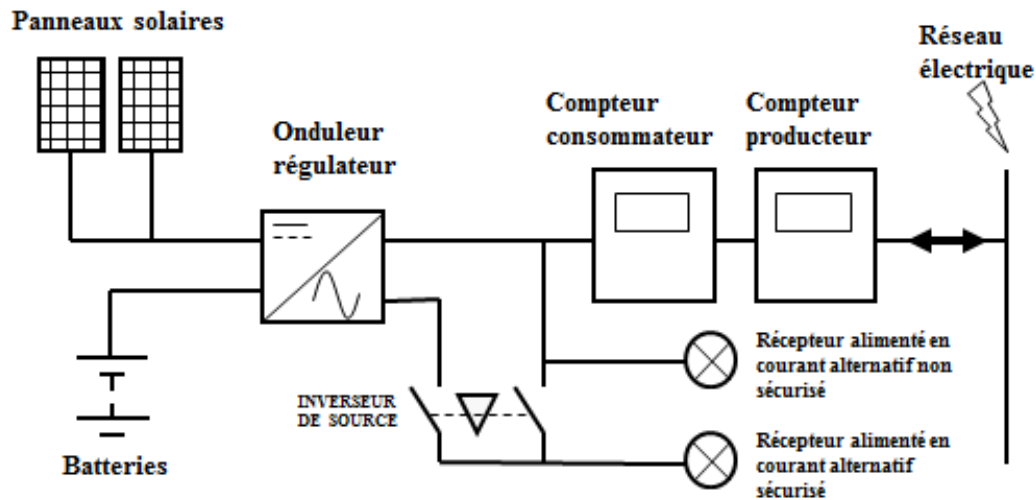


Figure 4.5 : Système de production d'énergie Solaire avec stockage.

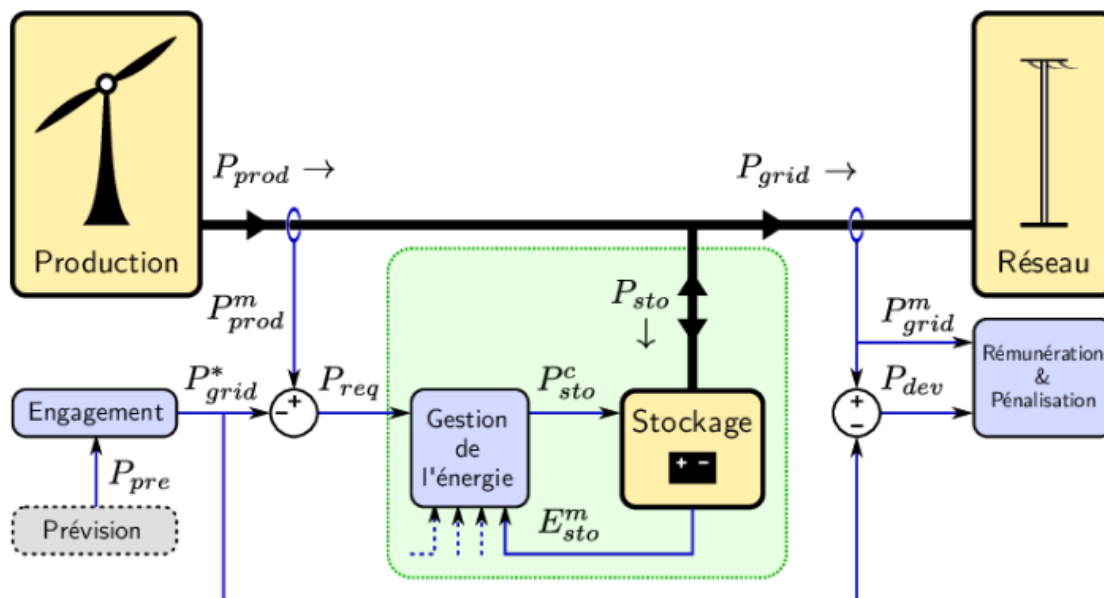


Figure 4.6 : Système de production d'énergie éolien avec stockage,

4.8 Résultats de simulation et analyse

Notre objectif est de considérer un système d'alimentation électrique connecté aux différents consommateurs qui eux-mêmes peuvent générer de l'énergie électrique. Les

énergies renouvelables seront présentes à la fois au niveau du réseau en général et des abonnés. Nous présenterons deux scénarios.

4.8.1 Premier scénario.

Echange de puissance entre les consommateurs (maisons et industrie) et le réseau électrique classique. Pour mieux analyser le comportement des Smart Grids nous devons considérer des situations extrêmes afin de comprendre les différentes interactions entre les productions des clients et celles du réseau électrique; pour cela nous considérerons différentes variantes affectant les quatre saisons de l'année, hiver, printemps, été et automne.

Les courbes montrent clairement les échanges de puissances entre les différents acteurs impliqués dans la production d'énergie électrique. En respectant les courbes de charge de tous les consommateurs ainsi que la production individuelle de chaque participant, nous pourrons voir clairement pour chacun sa consommation. Trois situations peuvent avoir lieu en une journée et pour le même client. Les différents cas possibles seront les suivants:

Cas 1: Le client est autonome et peut couvrir sa charge par sa propre production sans l'aide du réseau électrique existant

Cas 2: Le client est en excédent de production et peut fournir ses surcharges au réseau existant afin qu'il puisse le distribuer à d'autres clients

Cas 3: Le client est en déficit de puissance et doit utiliser le réseau comme complément pour couvrir sa courbe de charge.

Nous commençons par la journée d'automne et pour cela nous avons deux maisons qui peuvent produire de l'électricité à partir d'énergies renouvelables. La maison 1 utilise l'éolienne et la maison 2 utilise le solaire. Les deux sont intelligemment connectés au réseau électrique et peuvent intervenir à tout moment pour échanger la puissance électrique avec le réseau et les abonnés.

La courbe de charge attribuée à chacune des deux maisons pendant une journée de la saison d'automne nous donne les variations suivantes décrites par les courbes des figures 4.7 et 4.8

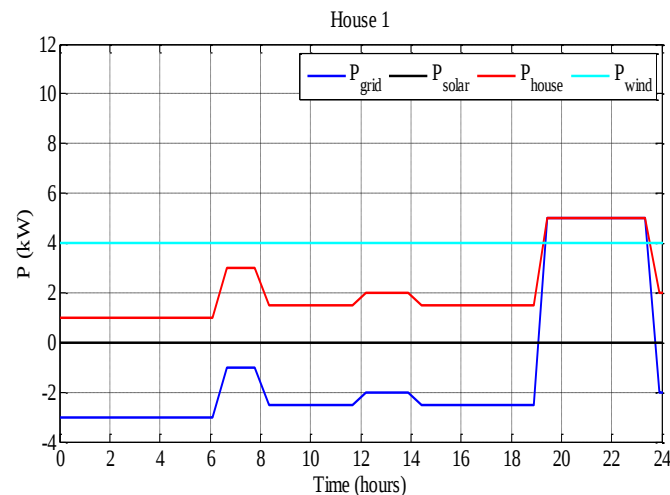


Figure 4.7 : Résultats de simulation de première maison pendant la période d'automne

La courbe de charge étendue de 24 heures de la maison 1 pendant une journée de la saison d'automne est décrite par la Figure (4.7) (couleur rouge). L'échange d'énergie avec l'extérieur est représenté par la courbe de puissance résiduelle (en couleur bleu) qui résulte de la différence entre la puissance délivrée par l'énergie éolienne de 4KW et la puissance consommée par la maison 1. Sur la base des résultats de la simulation, nous notons les situations suivantes:

- Entre 00 h 00 et 06 h 00 la maison1 consomme une puissance de 1KW, reste en automne et donne une puissance résiduelle de 3KW au réseau électrique.
- Un premier pic apparaît autour de 6h00 jusqu'à 8h00 atteint une valeur de 3KW; la maison 1 est toujours isolée et fournit au réseau électrique un surplus de puissance de 1KW.
- Entre 08h00 et 12h00 la maison consomme une puissance de 1.5KW et injecte au système électrique une puissance excédentaire de 2.5KW.
- Un deuxième pic réapparaît vers 12h00 jusqu'à 14h00 pour atteindre une valeur de 2KW ce qui réduit la puissance excédentaire à 2KW. Ce dernier augmente et détient une valeur de 2.5KW entre 14h00 et 19h00.
- Un troisième pic plus important apparaît vers 19h00 jusqu'à 24h: 00 atteignant une valeur de 5KW dépassant ainsi la capacité de production de la maison 1. La différence est compensée par le réseau électrique

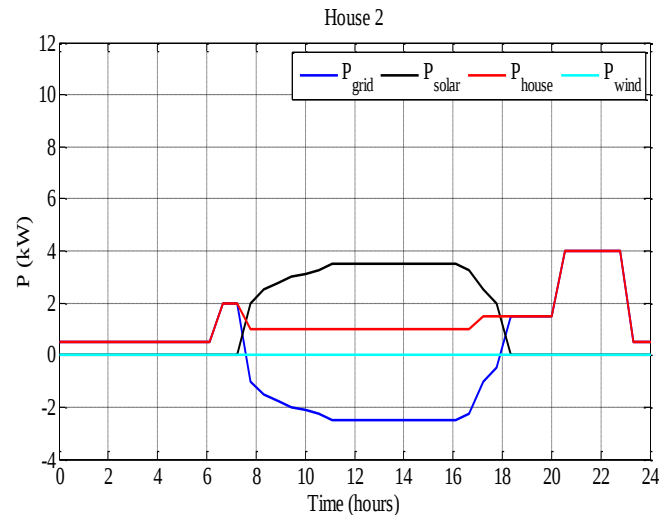


Figure 4.8 : Résultats de simulation de la deuxième maison pendant la période d'automne

La courbe de charge étendue sur 24 heures de la maison 2 est donnée par la figure (4.8) en couleur rouge. L'échange d'énergie avec l'extérieur est représenté par la courbe de puissance résiduelle (en couleur bleu) qui résulte de la différence entre la puissance délivrée par l'énergie solaire de 4KW et la puissance consommée par la maison 2. Selon les résultats des simulations, nous notons les situations suivantes:

- Entre minuit et 6h00 du matin, la maison 2 consomme une puissance de 0,5 kW livrée par le réseau électrique.
- La présence du premier pic de 06h: 00 à 08h00 de l'ordre de 2KW est assurée par le réseau électrique.
- Le soleil fait son apparition à partir de 08h 00, à ce moment la maison 2 consomme une puissance de 1KW qui sera délivrée par son énergie solaire. Alors la maison 2 reste en autonomie et donne une puissance résiduelle de 3KW jusqu'à 17h: 00.
- Entre 17h00 et 20h00 la maison 2 consomme une puissance de 1.5KW délivré par réseau électrique étant donné que le couché soleil fait son apparitions.
- Un deuxième pic de consommation de 4KW est observé de 20h 00 à 23h00, ce qui implique le réseau électrique pour satisfaire la demande énergétique de la maison 2.

La courbe de charge attribuée à chacune des deux maisons pendant une journée de la saison d'hiver nous donne les variations suivantes décrites par les courbes des Figures 4.9 et 4.10

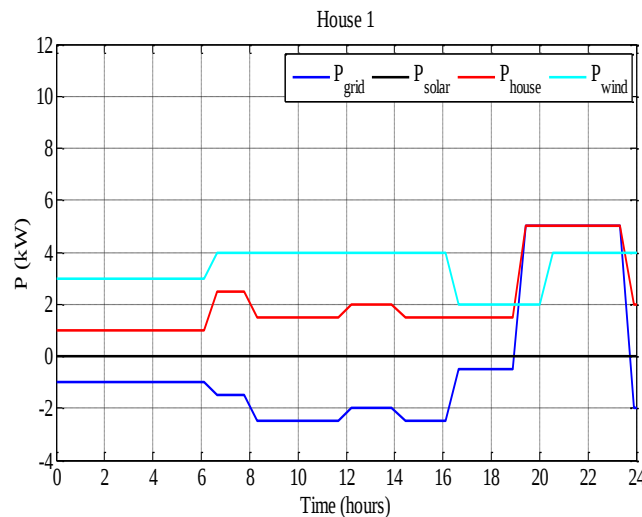


Figure 4.9 : Résultats de simulation de la première maison pendant la période d'hiver

La courbe de charge étendue de 24 heures de la maison 1 pendant une journée de la saison d'hiver est décrite par la Figure (4.9) (couleur rouge). L'échange d'énergie avec l'extérieur est représenté par la courbe de puissance résiduelle (en couleur bleu) qui résulte de la différence entre la puissance délivrée par l'énergie éolienne de (2KW jusqu'à 4KW) et la puissance consommée par la maison 1. Sur la base des résultats de la simulation, nous notons les situations suivantes:

- Entre 00 h 00 et 06 h 00 la maison1 consomme une puissance de 1KW, reste en automne et donne une puissance résiduelle de 2KW au réseau électrique.
- Un premier pic apparaît autour de 6h00 jusqu'à 8h00 atteint une valeur de 2.5KW; la maison 1 est toujours isolée et fournit au réseau électrique un surplus de puissance de 1.5KW.
- Entre 08h00 et 12h00 la maison consomme une puissance de 1.5KW et injecte au système électrique une puissance excédentaire de 2.5KW.
- Un deuxième pic réapparaît vers 12h00 jusqu'à 14h00 pour atteindre une valeur de 2KW ce qui réduit la puissance excédentaire à 2KW. Ce dernier augmente et détient une valeur de 2.5KW entre 14h00 et 16h00.
- Entre 16h00 et 19h00 la maison consomme une puissance de 1.5KW et injecte au système électrique une puissance excédentaire de 0.5KW
- Un troisième pic plus important apparaît vers 19h00 jusqu'à 24h: 00 atteignant une valeur de 5KW dépassant ainsi la capacité de production de la maison 1. La différence est compensée par le réseau électrique

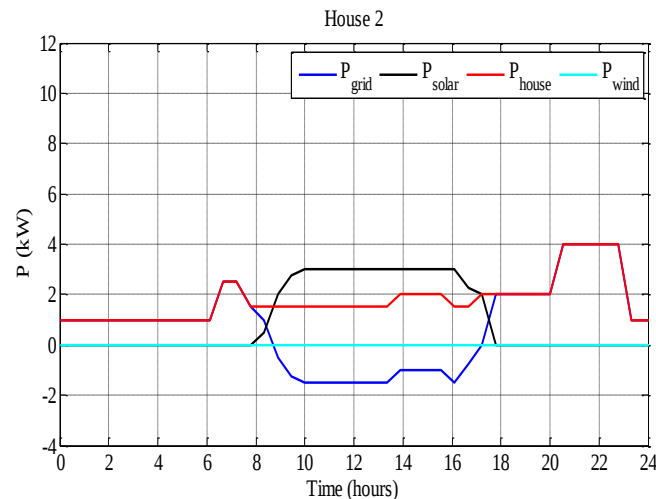


Figure 4.10 : Résultats de la simulation de la deuxième maison pendant la période d'hiver

La courbe de charge étendue sur 24 heures de la maison 2 est donnée par la figure (4.10) en couleur rouge. L'échange d'énergie avec l'extérieur est représenté par la courbe de puissance résiduelle (en couleur bleu) qui résulte de la différence entre la puissance délivrée par l'énergie solaire de 3KW et la puissance consommée par la maison 2. Selon les résultats des simulations, nous notons les situations suivantes:

- Entre minuit et 6h00 du matin, la maison 2 consomme une puissance de 1kW livrée par le réseau électrique.
- La présence du premier pic de 06h: 00 à 08h00 de l'ordre de 2.5KW est assurée par le réseau électrique.
- Le soleil fait son apparition à partir de 08h 00, à ce moment la maison 2 consomme une puissance de 1.5KW qui sera délivrée par son énergie solaire. Alors la maison 2 reste en autonomie et donne une puissance résiduelle de 1.5KW jusqu'à 14h: 00.
- Entre 14h00 et 16h00 la maison 2 consomme une puissance de 2KW délivré par son énergie et donne une puissance résiduelle de 1KW.
- Entre 16h00 et 17h00 la maison 2 consomme une puissance de 1.5KW délivré par son énergie et donne une puissance résiduelle de 1KW.
- Un deuxième pic de consommation de 4KW est observé de 20h 00 à 23h00, ce qui implique le réseau électrique pour satisfaire la demande énergétique de la maison 2.

La courbe de charge attribuée à chacune des deux maisons pendant la période du printemps nous donne les variations suivantes décrites par les courbes des Figures 4.11 et 4.12

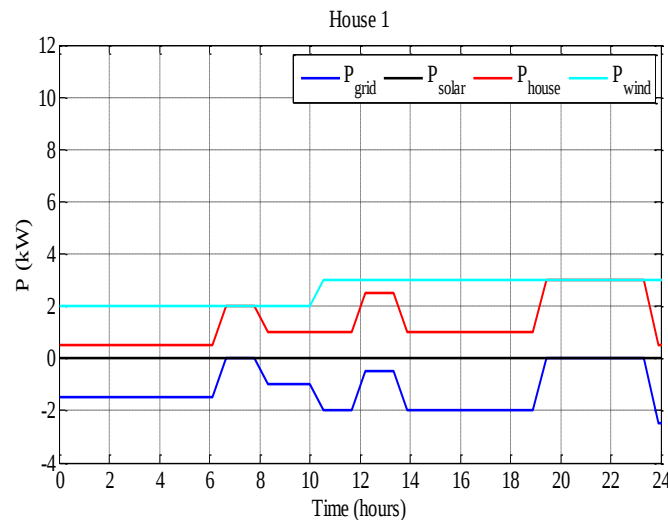


Figure 4.11 : Résultats de simulation de la première maison pendant la période du printemps

La courbe de charge étendue de 24 heures de la maison 1 pendant une journée de la saison d'hiver est décrite par la Figure (4.11) (couleur rouge). L'échange d'énergie avec l'extérieur est représenté par la courbe de puissance résiduelle (en couleur bleu) qui résulte de la différence entre la puissance délivrée par l'énergie éolienne de (2KW jusqu'à 4KW) et la puissance consommée par la maison 1. Sur la base des résultats de la simulation, nous notons les situations suivantes:

- Entre 00 h 00 et 06 h 00 la maison1 consomme une puissance de 0.5KW, reste en automne et donne une puissance résiduelle de 1.5KW au réseau électrique.
- Un premier pic apparaît autour de 6h00 jusqu'à 8h00 atteint une valeur de 2KW; la maison 1 est toujours isolée et reste en automne.
- Entre 08h00 et 10h00 la maison consomme une puissance de 1KW et injecte au système électrique une puissance excédentaire de 1KW.
- Entre 10h00 et 12h00 la maison consomme une puissance de 1KW et injecte au système électrique une puissance excédentaire de 2KW.
- Un deuxième pic réapparaît vers 12h00 jusqu'à 14h00 pour atteindre une valeur de 2.5KW ce qui réduit la puissance excédentaire à 0.5KW. Ce dernier augmente et détient une valeur de 2KW entre 14h00 et 19h00.

- Un troisième pic plus important apparaît vers 19h00 jusqu'à 24h: 00 atteignant une valeur de 3KW ne dépassant pas la capacité de production de la maison 1 donc elle reste autonome.

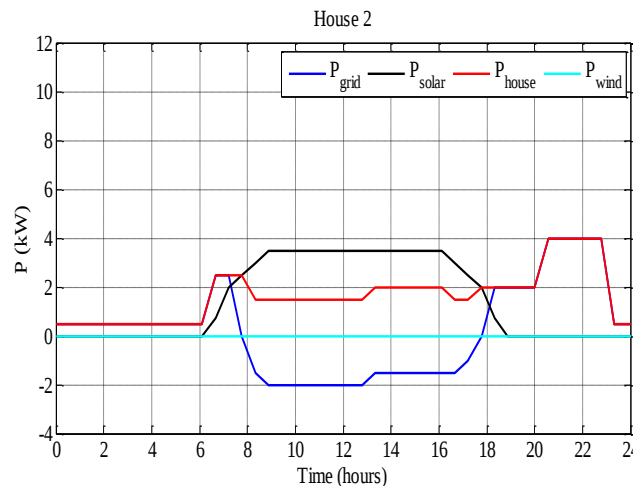


Figure 4.12 : Résultats de la simulation de la deuxième maison pendant la période du printemps

La courbe de charge étendue sur 24 heures de la maison 2 est donnée par la figure (4.12) en couleur rouge. L'échange d'énergie avec l'extérieur est représenté par la courbe de puissance résiduelle (en couleur bleu) qui résulte de la différence entre la puissance délivrée par l'énergie solaire de 3.5KW et la puissance consommée par la maison 2. Selon les résultats des simulations, nous notons les situations suivantes:

- Entre minuit et 6h00 du matin, la maison 2 consomme une puissance de 0.5kW livrée par le réseau électrique.
- La présence du premier pic de 06h: 00 à 08h00 de l'ordre de 2.5KW est assurée par le réseau électrique.
- Le soleil fait son apparition à partir de 08h 00, à ce moment la maison 2 consomme une puissance de 1.5KW qui sera délivrée par son énergie solaire. Alors la maison 2 reste en autonome et donne une puissance résiduelle de 2KW jusqu'à 13h: 00.
- Entre 13h00 et 16h00 la maison 2 consomme une puissance de 2KW délivré par son énergie et donne une puissance résiduelle de 1.5KW.
- Entre 16h00 et 17h00 la maison 2 consomme une puissance de 1.5KW délivré par son énergie et donne une puissance résiduelle de 1KW.
- Entre 17h00 et 20h00 la maison 2 consomme une puissance de 2KW délivré par le réseau électrique classique..

- Un deuxième pic de consommation de 4KW est observé de 20h 00 à 23h00, ce qui implique le réseau électrique pour satisfaire la demande énergétique de la maison 2.

La courbe de charge attribuée à chacune des deux maisons pendant la période d'été nous donne les variations suivantes décrites par les courbes des Figures (4.13 et 4.14)

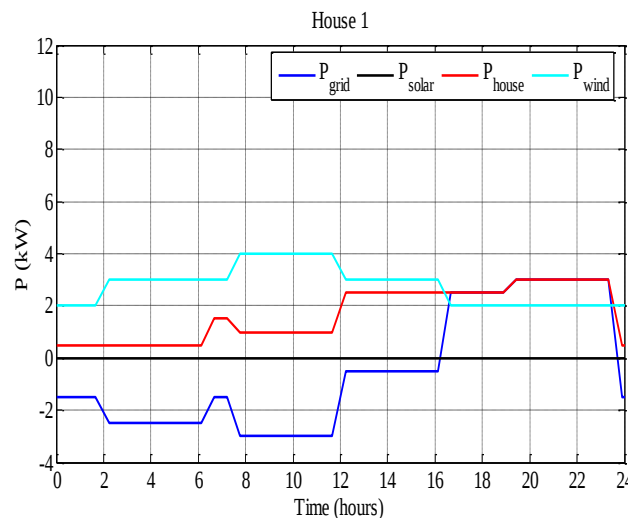


Figure 4.13 : Résultats de simulation de la première maison pendant la période d'été

La courbe de charge étendue de 24 heures de la maison 1 pendant une journée de la saison d'hiver est décrite par la Figure (4.13) (couleur rouge). L'échange d'énergie avec l'extérieur est représenté par la courbe de puissance résiduelle (en couleur bleu) qui résulte de la différence entre la puissance délivrée par l'énergie éolienne de (2KW jusqu'à 4KW) et la puissance consommée par la maison 1. Sur la base des résultats de la simulation, nous notons les situations suivantes:

- Entre 00 h 00 et 02 h 00 la maison1 consomme une puissance de 0.5KW, reste en automne et donne une puissance résiduelle de 1.5KW au réseau électrique.
- Entre 02 h 00 et 06 h 00 la maison1 consomme une puissance de 0.5KW, reste en automne et donne une puissance résiduelle de 2.5KW au réseau électrique.
- Un premier pic apparaît autour de 6h00 jusqu'à 8h00 atteint une valeur de 1.5KW; la maison 1 et injecte au système électrique une puissance excédentaire de 1.5KW.
- Entre 08h00 et 12h00 la maison consomme une puissance de 1KW et injecte au système électrique une puissance excédentaire de 3KW.
- Entre 12h00 et 16h00 la maison consomme une puissance de 2.5KW et injecte au système électrique une puissance excédentaire de 0.5KW.

- Entre 16h00 et 19h00 la maison consomme une puissance de 2.5KW l'énergie produite par l'éolienne ne peut satisfaire la demande de la maison ce qui induit le réseau électrique classique à intervenir pour combler le déficit.

- Un deuxième pic de consommation de 3KW est observé de 19h 00 à 23h00, ce qui implique le réseau électrique pour satisfaire la demande énergétique de la maison 1.

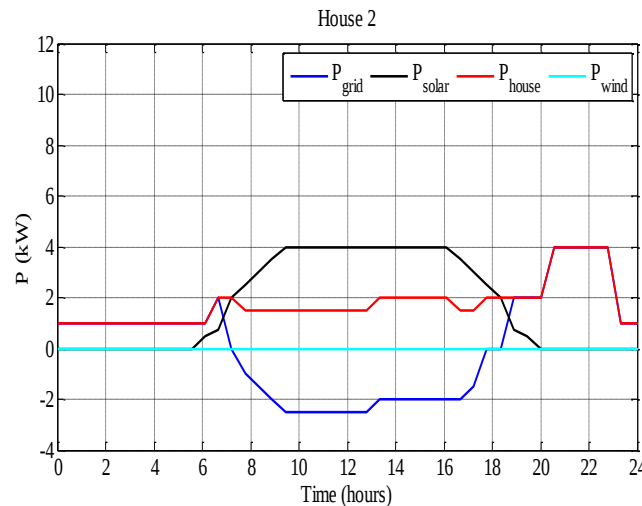


Figure 4.14 : Résultats de simulation de la deuxième maison pendant la période d'été

La courbe de charge étendue sur 24 heures de la maison 2 est donnée par la figure (4.14) en couleur rouge. L'échange d'énergie avec l'extérieur est représenté par la courbe de puissance résiduelle (en couleur bleu) qui résulte de la différence entre la puissance délivrée par l'énergie solaire de 4KW et la puissance consommée par la maison 2. Selon les résultats des simulations, nous notons les situations suivantes:

- Entre minuit et 6h00 du matin, la maison 2 consomme une puissance de 1kW livrée par le réseau électrique.

- La présence du premier pic de 06h: 00 à 08h00 de l'ordre de 2KW est assurée par le réseau électrique.

- Le soleil fait son apparition à partir de 08h 00, à ce moment la maison 2 consomme une puissance de 1.5KW qui sera délivrée par son énergie solaire. Alors la maison 2 reste en autonomie et donne une puissance résiduelle de 2.5KW jusqu'à 13h: 00.

- Entre 13h00 et 16h00 la maison 2 consomme une puissance de 2KW délivré par son énergie et donne une puissance résiduelle de 2KW.

- Entre 16h00 et 17h00 la maison 2 consomme une puissance de 2KW délivré par son énergie et donne une puissance résiduelle de 1KW.

- Entre 17h00 et 20h00 la maison 2 consomme une puissance de 2KW délivré par le réseau électrique classique.

- Un deuxième pic de consommation de 4KW est observé de 20h 00 à 23h00, ce qui implique le réseau électrique pour satisfaire la demande énergétique de la maison 2.

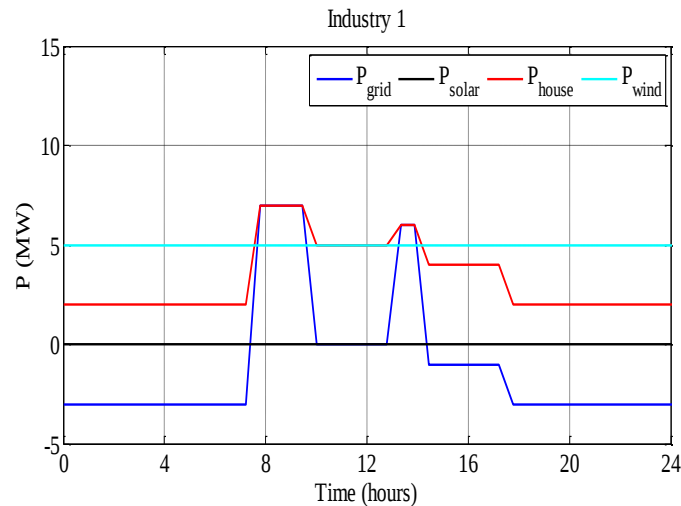


Figure 4.15 : Résultats de simulation de la première d'une usine

Contrairement aux maisons, les industries ont des pôles de production et de consommation très importants. La première industrie contient une éolienne de 5 MW et connectée au réseau électrique, elle est donc alimentée par les deux sources d'énergie. Sa courbe de charge est décrite par la répartition suivante: de 00h00 à 7h00 il consomme une puissance constante de 2MW fournie par l'éolienne. A 7h30 l'arrivée des ouvriers et la mise en marche des machines de l'industrie, un premier pic de consommation électrique est observé et atteint une valeur de 7 MW. Ce dernier ne peut être rencontré par l'assistance du réseau électrique que jusqu'à 10h00; alors la charge est réduite à 5 MW. La centrale devient autonome et sera alimentée par son éolienne jusqu'à 13h00. A ce moment, un deuxième pic est marqué avec la valeur de 6 MW et qui dure jusqu'à 14h00; la différence est assurée par le réseau électrique. Puis la réduction de charge à 4MW libère le réseau électrique pour donner le relais à son éolienne pour prendre en charge la consommation pour le reste de la journée. Sachant qu'après la fermeture de l'industrie à 17h00 la consommation est réduite à 2 MW (figure 4.15).

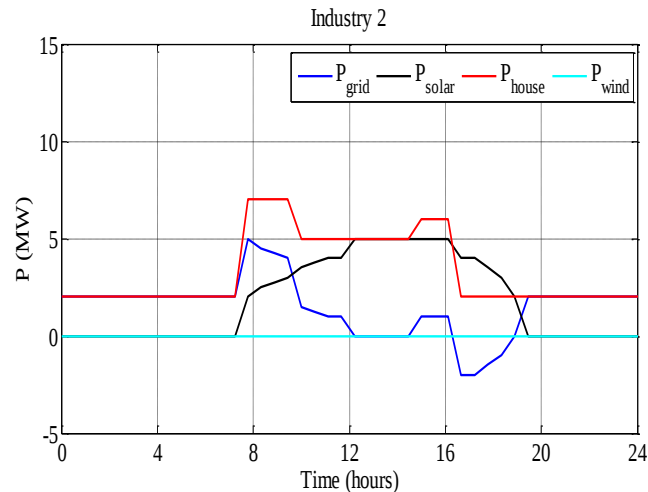


Figure 4.16 : Résultats de la simulation de la deuxième usine

Le deuxième scénario contient un parc solaire d'une capacité de 5 MW et connecté à un réseau électrique, il est donc alimenté par les deux sources d'énergie. Sa courbe de charge est décrite par la distribution suivante: de 00h00 à 6h00 il consomme une puissance constante de 2MW fournie par le réseau électrique.

Avec l'arrivée des ouvriers et la mise en route des machines de l'industrie, un pic de puissance de 7 MW est observé et seul le réseau électrique s'en charge. A 8h00 du matin où l'énergie solaire apparaît et commence à fournir de l'énergie, les deux énergies sont opérationnelles mais l'énergie solaire ne peut pas satisfaire à elle seule cette demande, et le pic durera jusqu'à 10h00. Suite à une réduction de puissance de 5 MW, le réseau électrique est libéré et seul le parc solaire alimente la centrale. Un deuxième pic de 6 MW est observé à 15h00 et se poursuit jusqu'à 16h00, ce qui implique à nouveau le réseau électrique. A 17 heures, avec la fermeture de l'industrie, la consommation est réduite à 2 MW. Cette dernière est fournie par le parc solaire jusqu'à 19h00 au coucher du soleil, le réseau électrique est à nouveau utilisé jusqu'à la fin de la journée chiffre (figure 4.16).

4.7.2 Deuxième scénario.

Echange de puissance entre les consommateurs eux-mêmes et le réseau électrique classique.

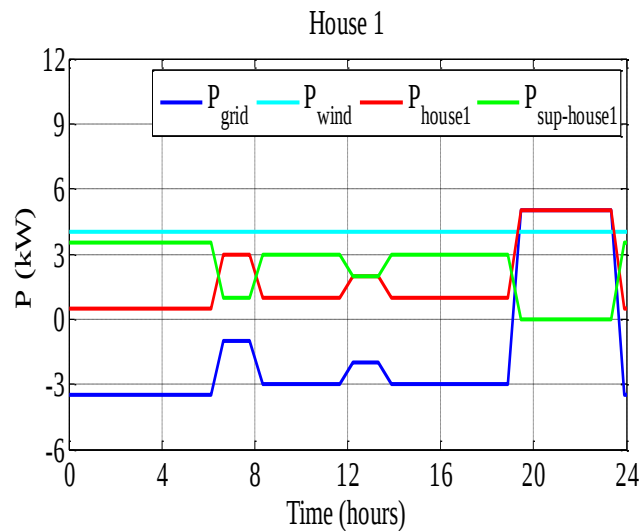


Figure 4.17 : Résultats de simulation de la première maison

La courbe de charge étendue de 24 heures de la maison 1 est décrite à la Figure (4.17) (couleur rouge). L'échange d'énergie avec l'extérieur est représenté par la courbe de puissance résiduelle résultant de la différence entre la puissance délivrée par l'éolienne de la maison 1 de l'ordre de 4 kW et sa consommation électrique (couleur verte). Sur la base des résultats de la simulation, nous notons les situations suivantes:

- Entre 00 h 00 et 06 h 00 la maison1 consomme une puissance de 0,5 KW, reste en autonomie et donne une puissance résiduelle de 3,5KW au réseau électrique.
- Un premier pic apparaît autour de 6h00 jusqu'à 8h00 atteint une valeur de 3KW; la maison 1 est toujours isolée et fournit au réseau électrique un surplus de puissance de 1KW.
- Entre 08h00 et 12h00 la maison consomme une puissance de 1KW et injecte au système électrique une puissance excédentaire de 3KW.
- Un deuxième pic réapparaît vers 12h00 jusqu'à 14h00 pour atteindre une valeur de 2KW ce qui réduit la puissance excédentaire à 2KW. Ce dernier augmente et détient une valeur de 3KW entre 14h00 et 19h00.
- Un troisième pic plus important apparaît vers 19h00 jusqu'à 24h: 00 atteignant une valeur de 5KW dépassant ainsi la capacité de production de la maison 1. La différence est compensée par le réseau électrique

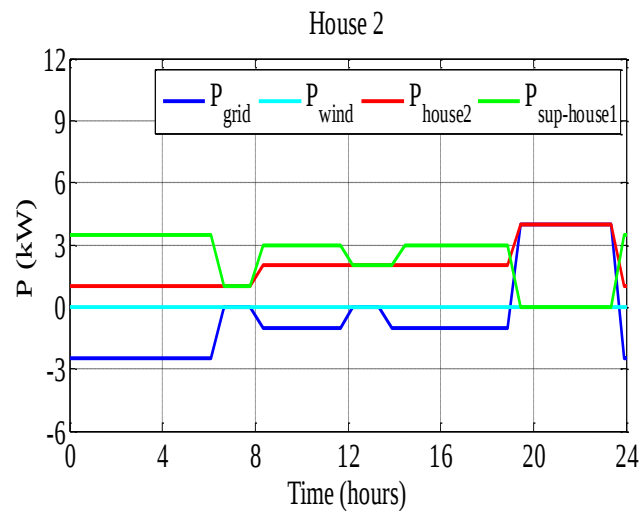


Figure 4.18 : Résultats de simulation de la deuxième maison

L'échange d'énergie électrique entre la maison 1 et la maison 2 est possible car la maison 1 a un résidu de puissance. La courbe de charge de la maison 2 est en rouge, la puissance délivrée par la maison 1 est en vert et la puissance supplémentaire fournie par le réseau électrique en bleu.

Sur la base des résultats de la simulation, nous notons les situations suivantes sur la figure (4.18):

- Entre 00h00 et 08h00: la maison 2 consomme une puissance de 1KW fournie par la maison 1 réduisant ainsi le surplus de la maison 1 dont le reste est mis à la disposition du besoin.
- A 8h00 la consommation de la maison 2 augmente et atteint une valeur de l'ordre de 2KW qui sera toujours alimentée par la maison 1.
- Une consommation de pointe est observée à 19h00 jusqu'à 24h: 00 ce qui implique le réseau électrique pour satisfaire la demande d'énergie électrique de la maison 2.

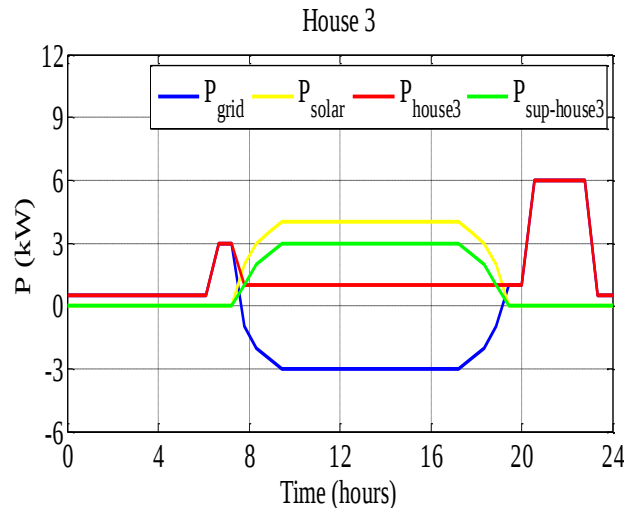


Figure 4.19 : Résultats de simulation de troisième maison

La courbe de charge étendue sur 24 heures de la maison 3 est donnée par la figure (4.19) en couleur rouge. L'échange d'énergie avec l'extérieur est représenté par la courbe de puissance résiduelle (en couleur verte) qui résulte de la différence entre la puissance délivrée par l'énergie solaire de 4KW et la puissance consommée par la maison 3. Selon les résultats des simulations, nous notons les situations suivantes:

- Entre minuit et 6h00 du matin, la maison 3 consomme une puissance de 0,5 kW livrée par le réseau électrique.
- La présence du premier pic de 06h: 00 à 08h00 de l'ordre de 3KW est assurée par le réseau électrique.
- Le soleil fait son apparition à partir de 08h 00, à ce moment la maison 3 consomme une puissance de 1KW qui sera délivrée par son énergie solaire. Alors la maison 3 reste en autonomie et donne une puissance résiduelle de 3KW jusqu'à 19h: 00.
- Un deuxième pic de consommation de 6KW est observé de 20h 00 à 23h00, ce qui implique le réseau électrique pour satisfaire la demande énergétique de la maison 3.

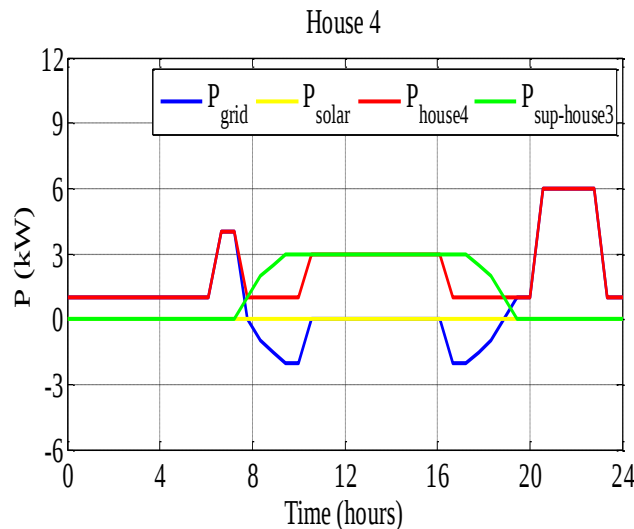


Figure 4.20 : Résultats de simulation de la quatrième maison

La figure (4.20) montre la courbe de charge (couleur rouge), la courbe de l'énergie solaire produite par la maison 3 (couleur verte) et enfin la courbe du réseau électrique (couleur bleue)

Sur la base des résultats de la simulation, nous notons les situations suivantes:

- Entre 00h00 et 06h00: la maison 4 consomme une puissance de 1KW qui est délivrée par le réseau électrique.
- Un premier pic apparaît de 06h00 à 08h: 00 atteignant une valeur de 4KW mais toujours assuré par le réseau électrique.
- De 08h00 à 19h00 la maison 4 est alimentée par l'énergie provenant de la maison 3 malgré la présence du deuxième pic de consommation qui est de l'ordre de 3 KW.
- Un troisième pic de consommation est observé à 20h00 jusqu'à 23h00 lequel de l'ordre de 6KW cette énergie est fournie par le réseau électrique.

4.8 Conclusion

La considération des différents scénarios dans ce chapitre a bien dévoilé la nécessité de l'apport des réseaux électriques intelligents tout en rappelant l'importance des éléments intelligents qui étaient présents et ont contribué efficacement à la bonne gestion de l'échange des puissances actives dans le réseau électrique. La consommation intelligente de l'énergie domestique impose une logique combinée entre la communication et le transfert de puissances entre les différents acteurs participants aux échanges de l'énergie électrique et des informations. Nous avons simulé l'échange d'énergie électrique entre les maisons et le réseau électrique. De la simulation, nous pouvons conclure, que s'il y a un grand nombre de maisons,

elles peuvent toujours contribuer efficacement à la réduction du réseau électrique en cas de forte demande en énergie électrique. Ainsi, la continuité du service est mieux assurée et nous évitons la procédure de délestage en cas de surcharge du réseau électrique.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans cette thèse concernent les systèmes de production d'énergie électrique renouvelable couplés au réseau. Ces dispositifs semblent amenés à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production et d'un meilleur respect de l'environnement. Associées à une production centralisée, ces petites ou moyennes unités peuvent permettre une mutualisation avantageuse de ressources très réparties, très fluctuantes, et contribuer à une meilleure gestion de l'énergie électrique dans un contexte de développement durable.

A travers cette thèse, nous avons proposé une stratégie pour permettre une autonomie énergétique du système de production d'électricité composé d'un générateur éolien et d'un générateur photovoltaïque, afin de maximiser la production de chacune des deux sources. L'objectif préalablement défini pour cette thèse consistait à l'insertion des éoliennes dans les réseaux électriques, afin d'augmenter la part de la production d'énergie renouvelable dans le réseau électrique, et d'optimiser les performances de cette production d'énergie, nous avons aussi associé un générateur photovoltaïque.

Le premier chapitre de cette thèse a été consacré à l'état de l'art, après avoir présenté les différentes sources d'énergies renouvelables existantes et le potentiel mondial, nous avons focalisé notre attention sur la production d'électricité éolienne et photovoltaïque. Différentes solutions technologiques permettant d'exploiter les ressources solaire et éolienne sont présentées.

Nous avons évoqué dans le deuxième chapitre, la modélisation de tous les éléments appartenant au système énergies renouvelables (éolienne et solaire).

Dans le troisième chapitre, nous avons investigué des tâches touchant à plusieurs aspects liés aux réseaux électriques intelligents. Dans un premier temps, nous avons formulé les problématiques liées à ce type de réseau tout en présentant les différents travaux réalisés dans ce domaine et les besoins de ces réseaux en infrastructures de télécommunication et en services informatiques. Dans le contexte de l'intégration des énergies renouvelables, nous avons étudié les architectures décentralisées de cette nouvelle génération de réseaux

électriques ainsi que les aspects de l'offre et de la demande pour intégrer ces énergies nouvelles. Le rôle important des compteurs intelligents a été mis en évidence afin de présenter les fonctions de distribution et de contrôle qu'ils permettent de réaliser. Nous avons également proposé une architecture globale de réseau électrique intelligent qui se base sur des compteurs intelligents,

Dans le chapitre 4, nous avons notamment proposé un protocole d'échange de puissance entre les clients et le réseau électrique classique. Pour pallier le manque d'énergie et de l'intégration des énergies produites par les clients eux-mêmes, nous avons proposé un mécanisme d'échanges dans le cadre d'une procédure de négociation de l'offre et de la demande d'énergie. Cette solution se base sur les agents mobiles qui parcourent le réseau, à la recherche des fournisseurs qui satisfont les patterns de consommation des clients requérants.

Perspectives

Dans cette thèse, notre objectif n'était pas de proposer une solution à tous les problèmes posés, car ce champ d'études pose de nombreux défis. Par exemple, nous n'avons pas considéré les aspects suivants qui, quoiqu'importants, pouvaient faire l'objet de travaux futurs:

- La conception et la réalisation des compteurs intelligents, Cela nécessite de construire la circuiterie interne et des contrôleurs ; cet aspect est en dehors du cadre strictement informatique qui nous intéresse dans cette thèse.
- Les questions de sécurité, un élément critique dans ces types de réseaux. Il faut implanter des mécanismes rigoureux pour prévenir les intrusions dans le réseau et les foyers, et éviter ainsi la subtilisation de l'énergie ou simplement l'accès par des personnes non autorisées à des informations privées sur le client.
- Une étude systématique des données de consommation stockées dans les bases de données de compteurs- Ces données sont généralement de grande taille, de l'ordre des téraoctets par semaine par foyer. Des techniques de prospection de ces données pourraient aider dans ce sens.

Annexe A

Démonstration de la formule de Betz

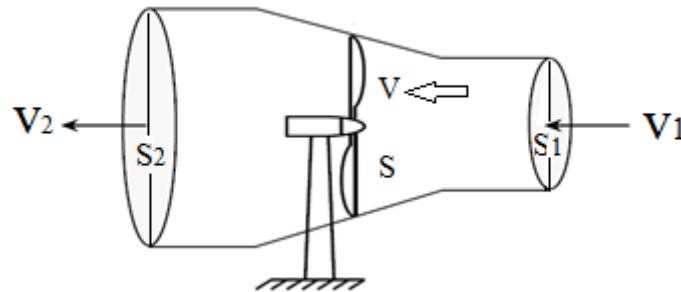


Figure (A.1) : *Veine de fluide traversant l'éolienne.*

Les grands principes théoriques de la physique et de la construction des éoliennes modernes ont été découverts au début du XX^e siècle. Il revient à l'ingénieur allemand Albert **Betz** d'avoir calculé et publié en 1926 que le rendement maximum théorique d'une éolienne idéale est d'environ 59,3% [83].

On considère pour cela un moteur éolien dans les pales balaient : une surface s et soit V la vitesse du vent au niveau des pâles. Le moteur est placé dans un air animé loin en amont d'une vitesse V_1 (la vitesse de l'air traversant la section S_1) et en aval d'une vitesse V_2 (la vitesse de l'air traversant la section S_2) soit S_1 et S_2 les sections amont et aval de la veine de fluide [84].

La masse d'air m déplacée par second est :

$$m = \rho s_1 V_1 = \rho s V = \rho s_2 V_2 \quad (\text{A.1})$$

Évaluons la variation d'énergie cinétique E de la masse d'air qui traverse par seconde le moteur éolien :

$$E = \frac{1}{2} \rho s V (V_1 + V_2) (V_1 - V_2) \quad (\text{A.2})$$

D'autre part la force F exercée sur le moteur éolien par l'air est égale à la variation de la quantité de mouvement de fluide lors de la traversée de la surface s . On a :

$$F = m\dot{V}_1 = m\dot{V}_2 = \rho s V (V_1 - V_2) \quad (\text{A.3})$$

La puissance absorbée par le moteur éolien dont le point de fonctionnement se déplace à la vitesse V par aux molécules d'air en mouvement est, dans ces condition :

$$P = FV = \rho s V^2 (V_1 - V_2) \quad (\text{A.4})$$

La variation d'énergie E est donc égale à la puissance P absorbée d'où :

$$\frac{1}{2} \rho s V (V_1 + V_2) (V_1 - V_2) = \rho s V^2 (V_1 - V_2) \quad (\text{A.5})$$

Cette dernière relation donne la vitesse V au niveau des pâles :

$$V = \frac{1}{2} (V_1 + V_2)$$

Valeur reportée dans les expressions de (A.3) et (A.4) conduit aux expressions suivantes :

$$F = \frac{1}{2} \rho s (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{A.6})$$

$$P = \frac{1}{4} \rho s (V_1^2 - V_2^2) (V_1 + V_2) \quad (\text{A.7})$$

Étudions la variation de la puissance recueillie en fonction de la vitesse résiduelle V_2 à l'aval de l'éolienne en supposant la vitesse du vent V_1 à l'amont constante.

Dans le but, calculons la dérivée $\frac{dP}{dV_2}$.

On obtient :

$$\frac{dP}{dV_2} = \frac{1}{4} \rho s (V_1^2 - 2V_1V_2 - 3V_2^2) \quad (\text{A.8})$$

L'équation $\frac{dP}{dV_2} = 0$ admet deux racines : $V_2 = -V_1$ qui n'a aucun sens physique et $V_2 = \frac{V_1}{3}$ qui

correspond à un maximum de la puissance.

En reportant cette valeur particulière de V_2 dans l'expression (A.7), on obtient :

$$P_m = \frac{16}{27} (0.5 s \rho V_1^3) \quad (\text{A.9})$$

Pour les calculs usuels, on assimile souvent V_1 à la vitesse V et l'on considère qu'une éolienne ne peut recueillir plus des $\left(\frac{16}{27}\right)$ de l'énergie totale du vent qui égale à $(0.5\rho sV_V^3)$, cette quantité étant appelée la limite de Betz.

Annexe B

1. Paramètres nominaux de la génératrice asynchrone

Puissance nominale	$1.8W$
Nombre de paires de pôles	$p=2$
Tension nominale	$V_n=220/380V$
Fréquence	$f=50Hz$

2. Paramètres électriques de la génératrice asynchrone

Résistance statorique	$R_s=3.38\Omega$
Résistance rotorique	$R_r=3.88\Omega$
Inductance statorique	$L_s=0.641H$
Inductance rotorique	$L_r=0.641H$
Inductance mutuelle	$M=0.317H$

3. Paramètres mécaniques de la génératrice asynchrone

Moment d'inertie	$J=0.005kg \cdot m^2$
Coefficient de frottement	$f=0.00001kg \cdot m^2 / s$

4. Paramètres de la turbine éolienne

Moment d'inertie de l'ensemble (turbine-pâles)	$J_t=50Kg \cdot m^2$
Rapport du multiplicateur	$G=80$
Nombre de pâles	3
Rayon de la turbine	$R=35m$
Masse volumique de l'air à la pression atmosphérique à $15^{\circ}C$	$\rho=1.22Kg / m^3$
Elasticité de l'axe	$K_m=7554.5Nm / rad$

Vitesse nominale du vent	$V_v=11m/s$
Coefficient de frottement	$f=0.0071kg \cdot m^2/s$
Vitesse relative.	$\lambda_{gr}=8.1$
Coefficient de puissance	$C_p=0.48$

Annexe C

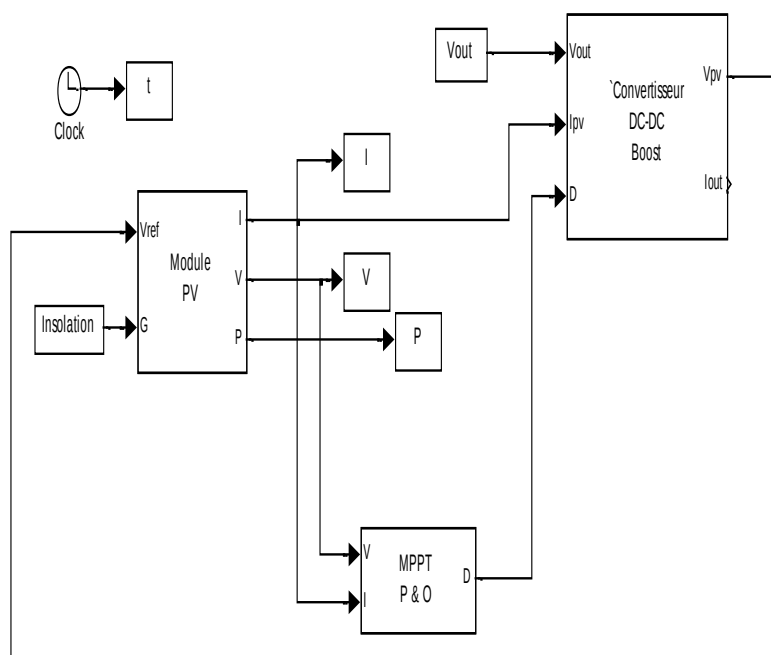


Figure C.1. Schéma bloc de la simulation d'un générateur photovoltaïque

Tension à circuit ouvert	Voc (V)	21.9
Tension optimale	Vm (V)	17.5
Courant de court-circuit	Isc (A)	4.95
Courant optimal	Im (A)	4.57
Puissance maximale	Pm (W)	80
Coefficient de température de Isc	K _I	0.020 %/K
Coefficient de température de Vco	K _V	-0.34 %/K
Résistance série à Tstc	R _s (Ω)	0.0102
Résistance parallèle à Tstc	R _p (Ω)	4.6278

Tableau C . 1 Caractéristiques du module PV Suntech STP080 12/B6 monocristallin

Webographie

- [01] Les systèmes de stockage de l'énergie, 2010, [réf de novembre 2012], disponible sur :
<http://panneausolaire.free.fr/installations.php>
- [02] World Energy Outlook 2002. IEA Publications.
- [03] Types of geothermal power plants: Binary cycle plant, Energy Almanac, 2009, [réf de décembre 2012], disponible sur:
<http://energyalmanac.ca.gov/renewables/geothermal/types.html>
- [04] Ecole Centrale de Nantes.
<http://www.ec-nantes.fr/>
- [05] SATIE. Les Projets de Recherche.
http://www.satie.ens-cachan.fr/php/projdeta.php?id_proj=48
- [06] Wave Dragon – a large offshore wave energy converter.
<http://www.wavedragon.net/>
- [07] Wave Energy.
http://europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/htmlu/wavint.html
- [08] Ocean Power Delivery Limited.
<http://www.oceanpd.com/>
- [09] Archimedes Waveswing AWS II.
<http://www.waveswing.com/>
- [10] Mission Interministérielle de l'Effet de Serre.
<http://www.effet-de-serre.gouv.fr>
- [11] SmartGrids – CRE, « Smart Grid City : une gestion locale des sources d'approvisionnement et de consommation », 2011, [réf de août 2009], disponible sur :
<http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=smartcities-smart-grid-city>,
- [12] SATIE. Les Projets de Recherche.
http://www.satie.ens-cachan.fr/php/projdeta.php?id_proj=48
- [13] Wave Energy.
http://europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/htmlu/wavint.html
- [14] <http://blog.solorea.com/cellule-photovoltaïque>
- [15] Page d'accueil de ZigBee. sur
<http://www.zigbee.org>
- [16] Publications de l'Union internationale des télécommunications. Sur
<http://www.itu.int>

Bibliographies

- [17] Aurélie Chabaud, « Micro-réseau intelligent pour la gestion des ressources énergétiques », Thèse de doctorat, Université de Perpignan via Domitia, Soutenu le 04/07/2014.
- [18] Tristan Gaudiaut, « La Terre se réchauffe », STATISTA, 19 oct. 2020.
- [19] BURTON T. SHARPE D. JENKINS N. BOSSANYI E. HASSAN G. «Wind energy Handbook», England, 2001.
- [20] POITIERS F., « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne. Machine asynchrone à cage autonome. Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat, école polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [21] Hristiyan KANCHEV, « Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable : Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain », Thèse de doctorat sous la direction Bruno SARENI, Professeur, INPT-ENSEEIH, Laboratoire LAPLACE, l'Ecole Centrale de Lille et à l'Université Technique de Sofia, Soutenue le 24 janvier 2014.
- [22] Kuo, P. L., Chen, W. F., Lin, C. Y., « Multichelate-Functionalized Carbon Nanospheres used for Immobilizing Pt Catalysts for Fuel Cells », Journal of Power Sources, vol. 01/2009, pp. 194 – 234, 2009.
- [23] Agence Nationale Pour la Gestion des Déchets Radioactifs. <http://www.andra.fr/>
- [24] B. Robyns, P. Bastard, "Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques", La revue 3EI n°39, Décembre 2004.
- [25] Directive 2003/54/CE du Parlement européen et du Conseil Européen.
- [26] Chambolle.T, Meaux.F, « Rapport sur les nouvelles technologies de l'énergie », Paris 2004.
- [27] Berseneff, B., « Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur », Thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Grenoble sous la direction de N. Hadjsaïd et Y. Bésanger, G2ELAB, Grenoble, France, soutenue en 2010
- [28] F.E.T. Technologies, «Le photovoltaïque, », pp. 1-10. , 1921.
- [29] Cedric.C, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse 2008.
- [30] C. Lerouge, et al, «Recherche & Industrie Photovoltaïque (PV) aux Etats-Unis», 2006.
- [31] IEA Publications BP, « statistical review of world energy 2013 », bp statistical review of world energy, bp.com/statiscalreview, juin 2013.
- [32] Gil H.A. and Joos, G., « Models for quantifying the economic benefits of distributed generation », IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 2, pp. 327-335, 2008
- [33] Gellings, C., « The smart Grid », The Fairmont press, 2009.
- [34] I. Vechiu, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un

- réseau autonome», Thèse de Doctorat de l'Université du Havre, France 2005.
- [35] Wang, C. and Hashem Nehrir, M., « Power Management of a Stand-Alone Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Energy System », IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 23, pp.957-967, n° 3, 2008.
- [36] MEKKAOUI Naïma, « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée », mémoire de Magister, Université de Batna, 2004.
- [37] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France 2005.
- [38] MOUSSAOUI Mohamed, « Application des FACTS pour améliorer les performances dynamiques d'un parc éolien raccordé au réseau électrique », Université Saïda, Master soutenu en 2012.
- [39] Nicolas LAVERDURE, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2005.
- [40] Tarak GHENNAM, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique », Thèse de Doctorat, Université d'Alger, 2011.
- [41] Archimedes Waveswing AWS II. <http://www.waveswing.com/>
- [42] O. Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de CACHAN, Décembre 2002.
- [43] S. El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de Doctorat de L'Université des Sciences et Technologies de Lille1 (USTL), Soutenu le 04/06/2017.
- [44] C. Alonso, « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie », Mémoire pour l'Habilitation à Diriger les Recherches, Université Paul Sabatier-Toulouse III, France 2003.
- [45] I. Vechiu, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de Doctorat de l'Université du Havre, France 2005.
- [46] KHALED FERKOUS, « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Université MENTOURI Constantine, 2009.
- [47] L. BAGHLI « Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone », notes de cours, IUFM de Lorraine – UHP, 2005.
- [48] Hernández, O.G.G.J.C., Jurado, F., « Photovoltaic Devices under Partial Shading Conditions » (2012) International Review on Modelling and Simulations (IREMOS), 5 (1), pp. 414-425
- [49] R.Ramaprabha, Dr.B.L.Mathur, « Comparative Study of Series and Parallel configurations of Solar PV Array under Partial Shaded Conditions », iremos Vol. 3. n. 6, pp. 1363-1371
- [50] M. Mostefai, A. Miloudi, Y. Miloud, « An Intelligent Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Systems Based on Neural Network », International Review on Modelling and Simulations (I.R.E.MO.S.), Vol. 6, N. 5 ISSN 1974-9821 October 2013.
- [51] Labouret, M. Villos, «Energie Solaire Photovoltaïque », 2ème édition, pp. 67.85, 2003-

2005

- [52] L.A. Hecktheuer, A. Krenzinger, C.W.M. Prieb, "Methodology for Photovoltaic Modules Characterization and Shading Effects Analysis", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, Vol. 24, no. 1, pp. 26-32, 2002
- [53] Alexandre Perles, « An Adaptive Multi-Agent System for the Distribution of Intelligence in Electrical Distribution Networks: State Estimation », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Soutenu le 09/02/2017.
- [54] S. G. a. P. L. Qiqi Zhang, « Smart City Grid :The start to develop smart grid », EProduct E-Service and E-Product E-Service and E-Entertainment (ICEEE), International Conference, pp. 1-4, nov. 2010.
- [55] C. Abbey, « The Hydra-Québec Distribution Smart Grid Zone », Hydro-Québec Research Institute (IREQ), 2011.
- [56] Y. T. Saifur Rahman, « Intelligent Distributed Autonomous Power Systems (IDAPS) », IEEE PES Summer Meeting in Tampa, Florida, June 24-28, 2007.
- [57] Benaouda Baghdad, « la communication sans fil dans un réseau électrique intelligent (smart grid) - méthodologie de développement », Thèse de Doctorat, Université du Québec Montréal, Soutenu Avril 2013.
- [58] N.Bemana, « Modélisation des injections de puissance d'un système PV sur un réseau public », mémoire de Master en Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, institut internationale Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 2012.
- [59] R. Missaoui Badreddine, « Gestion Energétique optimisée pour un bâtiment intelligent multi-sources multichargés : diérents principes de validations ». Electric power. Universite de Grenoble,. French, 2012
- [60] Tohumoglu, Y. « Méthodes supplémentaires et de mesure des câbles à fibres optiques utilisés dans la communication », Mémoire de maîtrise, Université de Niğde, 1998.
- [61] Ma, R., Chen, H., Huang, R. et Meng, W. « Communication sur réseau intelligent: ses défis et ses opportunités. » Transactions IEEE sur Smart Grid, 4 (1), 36-46, 2013.
- [62] Güngör, V. C., Sahin, D., Kocak, T., Ergüt, S., Buccella, C., Cecati, C. et Hancke, G. P. « Technologies de réseau intelligent: technologies et normes de communication», IEEE Transactions on Industrial Informatics, 7 (4), 529-539, novembre 2011.
- [63] Gungor, V. C., Sahin, D., Kocak, T., et Ergut, S., « Une enquête sur les applications potentielles des réseaux intelligents et les exigences de communication », Transactions IEEE sur l'informatique industrielle, 9 (1), 2013.
- [64] D. L. Ha ; « Un système avancé de gestion d'énergie dans le bâtiment pour coordonner production et consommation », PhD en Électronique, Électrotechnique, Automatique, Traitement du Signal, Université de Grenoble 2007.
- [65] Usman, A. et Shami, S., « Évolution des technologies de communication dans les réseaux intelligents », les revues des énergies renouvelables et durables. Elsevier, 2012.
- [66] IEEE. (2010). Actes de la conférence internationale de l'IEEE sur les communications par réseau intelligent.
- [67] Lila Croci., « Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/super condensateurs », Automatic Control Engineering. Université de Poitiers,. French, 2013.

- [68] B. Robyns, P. Bastard, « Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques », La revue 3 N° 39, Décembre 2004.
- [69] Page d'accueil de ZigBee. sur <http://www.zigbee.org>
- [70] S. Chennai, « Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle », Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Mohamed Khider – Biskra, 2013.
- [71] Boris Bersene. « Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur », Sciences de l'ingénieur, Université de Grenoble, 2010.
- [72] Guzelgoz, S., « Caractérisation des canaux de communication sans fil et de lignes électriques avec des applications aux réseaux intelligents », Thèse de doctorat, Université de Floride du Sud, 2011.
- [73] Y. Rionneau., « gestion des flux énergétique dans un système photovoltaïque avec stockage connecter au réseau », Application a l'habitat. Electric power”. Université Joseph Fourier - Grenoble I, French, 2009.
- [74] G. Basso., « Approche a base d'agents pour l'ingénierie et le contrôle de micro-réseaux. Computers and Society », Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, French, 2013.
- [75] Aurélie Chabaud, « Micro-réseau intelligent pour la gestion des ressources énergétiques », Automatique / Robotique. Université de Perpignan Via Domitia, 2014.
- [76] Housseyn KAHAL, «Commande robuste d'une GASDE intégrée dans un système éolien à double rotor », Thèse de doctorat, Université Hassiba Benbouali de Chlef, 2016.
- [77] J.A. Momoh., « Smart grid design for efficient and flexible power networks operation and control ». In *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES*, pages 1–8. IEEE, 2009.
- [78] G. Guérard, S.B. Amor, and A. Bui., « Survey on smart grid modelling. », *International Journal of Systems, Control and Communications*, 4(4) :262–279, 2012.
- [79] « La chaîne de valeur du marché des smart grids », www.items.fr. 2012.
- [80] Smart Grids-cre, Dossier, « les compteurs évolués », <http://www.smartgridscre.fr/index.php>.
- [81] Guillaume Guérard., « Optimisation de la diffusion de l'énergie dans les Smart Grids », Thèse de doctorat. Université de Versailles, Soutenue le 27/11/2014.
- [82] Richard Bellman., « Functional equations in the theory of dynamic programming », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 41(7) :482, 2018.
- [83] MEKKAOU Ali, LAOUER Mohammed, YOUNES Mimoun , « Power exchange in smart grids integrating renewable energy », *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, ISSN 0033-2097, R. 96 NR 12/2020, pp 91-94.
- [84] MEKKAOUI Naïma , «Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée », mémoire de Magister Université de Batna 2004.

